



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων

Διπλωματική Εργασία

Ευφροσύνη Δ. Σίμου

Επιβλέπων:

Παναγιώτης Κωττής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων

Διπλωματική Εργασία

Ευφροσύνη Δ. Σίμου

Επιβλέποντες:

Παναγιώτης Κωττής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αρτέμης Βουλκίδης, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Ιουλίου 2013.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευφροσύνη Δ. Σίμου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright @ Ευφροσύνη Σίμου, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες και την ηλεκτρονική έχει καταστήσει δυνατή τη σχεδίαση και την υλοποίηση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks-WSN) χαμηλού κόστους. Οι κόμβοι-αισθητήρες (Wireless Sensors-WS) είναι αυτόνομοι ενεργειακά και μάλιστα διαθέτουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα με αποτέλεσμα ο σημαντικότερος σχεδιαστικός παράγοντας στα WSN να είναι ο περιορισμός της ενεργειακής κατανάλωσης των WS. Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το σχεδιασμό αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για WSN με κριτήριο αποτελεσματικότητας τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Μία από τις συνηθέστερες λύσεις για τον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας σε WSN είναι η Συνάθροιση Δεδομένων (Data Aggregation).

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της εφαρμογής της Θεωρίας Παιγνίων για την υλοποίηση συνάθροισης δεδομένων σε WSN. Αρχικά γίνεται μία αναφορά στα WSN και στις ιδιομορφίες που παρουσιάζουν ως δίκτυα, στη συνέχεια γίνεται μία παρουσίαση των επικρατέστερων αλγορίθμων για την υλοποίηση συνάθροισης δεδομένων σε WSN και τέλος προτείνεται ένας αλγόριθμος βασισμένος στη Θεωρία Παιγνίων για την πραγματοποίηση συνάθροισης δεδομένων σε WSN.

Λέξεις-Κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Συνάθροιση Δεδομένων, Θεωρία Παιγνίων

Abstract

Recent advancement in wireless communications and electronics has enabled the development of low-cost Wireless Sensor Networks (WSN). The wireless sensor nodes can only be equipped with a limited power source. In some application scenarios, replenishment of power resources might be impossible. Therefore, power conservation is the most important design factor of WSN. During the last years, many researchers have designed energy efficient algorithms and protocols for WSN. One of the most common solutions for energy conservation is Data Aggregation. In-network aggregation is the process of gathering and routing information through a WSN, processing data at intermediate nodes with the objective of reducing energy consumption, thereby increasing network lifetime.

The purpose of this thesis is the study of the use of Game Theory for Data Aggregation in WSN. Firstly, the principles of WSN are presented. Furthermore, a review of the existing literature on techniques and protocols for data aggregation is provided. Finally, an algorithm based on Game Theory is proposed for the implementation of data aggregation in WSN.

Key Words

Wireless Sensor Networks, Data Aggregation, Game Theory

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Π. Κωττής, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της καθώς και για τη συνεχή του καθοδήγηση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Δρ. Αρτέμη Βουλκίδη για την εξαιρετική μας συνεργασία.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που ήταν δίπλα μου και με στήριξε σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 1.1. Ο κόμβος-αισθητήρας
 - 1.2. Σχεδιαστικοί παράγοντες στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 1.3. Εφαρμογές των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων
2. Χωρικές και Χρονικές Συσχετίσεις στις Μετρήσεις των Κόμβων-Αισθητήρων
 - 2.1. Στοχαστικές Ανελιξίες και Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 2.2. Μαθηματική Διατύπωση των Χωρικών και Χρονικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 2.2.1 Μαθηματική Διατύπωση των Χωρικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 2.2.2 Μαθηματική Διατύπωση των Χρονικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 2.3. Αξιοποίηση των Χωρικών και Χρονικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
3. Η Συνάθροιση Δεδομένων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 3.1. Βασικά Στοιχεία της Συνάθροισης Δεδομένων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 3.2. Επικοινωνιακά Πρωτόκολλα για την Υλοποίηση Συνάθροισης Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 - 3.3. Τρόποι Περιγραφής Δεδομένων και Συναρτήσεις για την Πραγματοποίηση Συνάθροισης Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
4. Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων
 - 4.1. Μαθηματική Περιγραφή και Κατηγοριοποίηση Παιγνίων
 - 4.1.1. Μαθηματικές Περιγραφές Παιγνίων
 - 4.1.1.1. Παίγνιο Κανονικής ή Στρατηγικής Μορφής
 - 4.1.1.2. Παίγνιο Εκτεταμένης Μορφής
 - 4.1.2. Κατηγοριοποίηση Παιγνίων
 - 4.2. Η Έννοια της Στρατηγικής στη Θεωρία Παιγνίων
 - 4.2.1. Ανόθευτες Στρατηγικές και Μικτές Στρατηγικές
 - 4.2.2. Κυρίαρχη Στρατηγική
 - 4.3. Ισορροπία στη Θεωρία Παιγνίων
5. Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στις Ασύρματες Επικοινωνίες

6. Ανάπτυξη του Προβλήματος
 - 6.1. Διατύπωση του Προβλήματος
 - 6.2. Ανάλυση
 - 6.3. Διατύπωση του Προβλήματος ως Παίγνιο
 - 6.4. Αποτελέσματα-Προτεινόμενη Στρατηγική Χρονισμού
7. Συμπεράσματα
8. Βιβλιογραφία

Παράρτημα για το Κεφάλαιο 1

Παράρτημα για το Κεφάλαιο 2

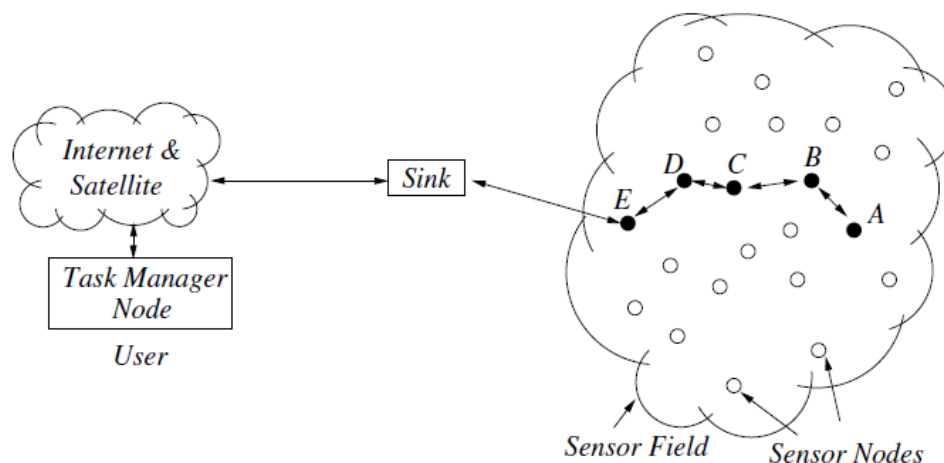
Παράρτημα για το Κεφάλαιο 3

Παράρτημα για το Κεφάλαιο 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks-WSN) αποτελούνται από ένα πλήθος κόμβων-αισθητήρων (Wireless Sensors-WS) που αναπτύσσονται με μεγάλη πυκνότητα σε κάποια περιοχή και επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα. Στόχος ενός WSN είναι η παρακολούθηση κάποιου φαινομένου που λαμβάνει χώρα είτε μέσα είτε κοντά στην περιοχή αυτή. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατό να παρακολουθηθεί μέσω μετρήσεων ενός ή περισσότερων μεγεθών από τους WS του δικτύου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα μεγέθη αυτά μπορεί να είναι η θερμοκρασία, η ένταση φωτός, η ένταση υπέρυθρης ακτινοβολίας, η υγρασία.

Στο Σχ. 1.1 φαίνεται ένας μεγάλος αριθμός WS στην περιοχή παρατήρησης. Καθένας από αυτούς έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα και να τα δρομολογεί προς τον κόμβο-συλλέκτη (sink node), ο οποίος πιθανώς να επικοινωνεί με άλλα δίκτυα.



Σχήμα 1.1 Κόμβοι-αισθητήρες διεσπαρμένοι σε μία περιοχή παρατήρησης.

Βασικό χαρακτηριστικό των WSN αποτελεί το ότι δεν χρειάζεται να είναι καθορισμένη η θέση των WS. Δηλαδή η τοποθέτηση των WS γίνεται κατά τυχαίο τρόπο. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά δυνατή την εγκατάσταση WSN σε δυσπρόσιτες περιοχές καθώς και τη λειτουργία του δικτύου στην περίπτωση όπου ορισμένοι WS μετακινηθούν ή τεθούν εκτός λειτουργίας. Φυσικά, προκειμένου να είναι δυνατή αυτή η ανεξαρτησία της λειτουργίας από τη θέση των κόμβων είναι απαραίτητη η ύπαρξη πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που καθιστούν δυνατή την αυτό-οργάνωση του δικτύου (self-organizing capabilities). Πρέπει να επισημανθεί ότι

οι WS είναι αυτόνομοι ενεργειακά και μάλιστα έχουν περιορισμένες πηγές ενέργειας. Πρέπει, επομένως, τόσο η κατασκευή των WS όσο και ο σχεδιασμός των πρωτόκολλων επικοινωνίας τους να έχουν ως κριτήριο την υψηλή ενεργειακή απόδοση. Στον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης συμβάλλει και η υιοθέτηση ενός κατάλληλου multi-hop σχήματος επικοινωνίας καθώς έτσι οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων είναι μικρές και δεν απαιτείται υψηλή ενέργεια για τη μετάδοση πληροφορίας. Οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των WS σε συνδυασμό με τις ενδεχόμενες ιδιότητες του υπό παρατήρηση φυσικού φαινομένου εισάγουν είτε χωρική είτε χρονική συσχέτιση των μετρήσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των WSN είναι η δυνατότητα των WS να συνεργάζονται προς επίτευξη κοινών στόχων που αφορούν το δίκτυο στο σύνολό του. Οι WS διαθέτουν έναν μικροεπεξεργαστή με τον οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα τους με στόχο να προωθούν μόνο τα απαραίτητα και καταλλήλως επεξεργασμένα δεδομένα. Τα χαρακτηριστικά αυτά των WSN αναδεικνύουν μοναδικές προκλήσεις ως προς τη διατύπωση των σχετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

1.1 Ο κόμβος-αισθητήρας

Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες και την ηλεκτρονική έχει καταστήσει δυνατή τη σχεδίαση και την υλοποίηση WSN χαμηλού κόστους. Είναι πλέον εφικτή με χαμηλό κόστος η κατασκευή μικρών WS με μικρή ενεργειακή κατανάλωση.

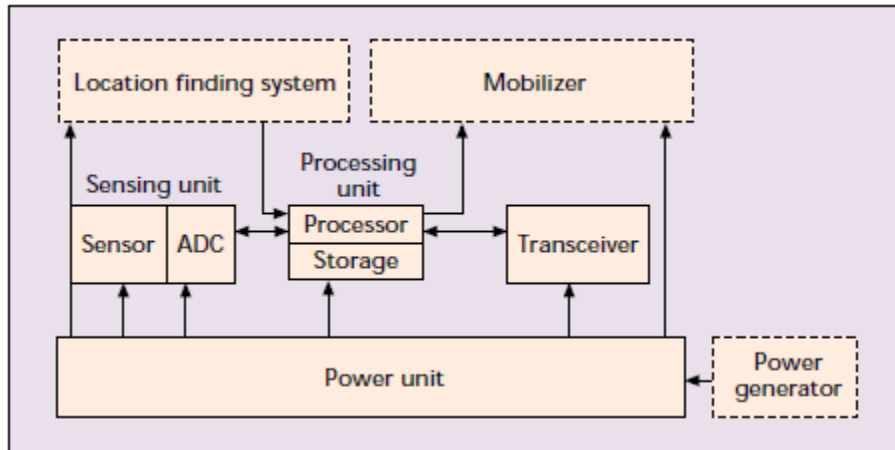
Οι WS είναι ενσωματωμένα συστήματα που αποτελούνται από τα εξής τμήματα:

1. Τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας, η οποία περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ασύρματη επικοινωνία καθώς και την προγραμματιζόμενη μνήμη όπου αποθηκεύεται ο κώδικας της εφαρμογής. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτό το τμήμα είναι ένας πομποδέκτης, ένας μικροεπεξεργαστής, μία πηγή ενέργειας, μία μονάδα μνήμης καθώς επίσης και κάποιο πλήθος αισθητήρων. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός τέτοιων μονάδων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Mica2, Cricket, MicaZ, Iris, Telos, SunSPOT, Imote2.
2. Την μονάδα αίσθησης, η οποία είναι συνήθως ενσωματωμένη στη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και μπορεί να περιλαμβάνει διάφορα είδη αισθητήρων. Συνήθως, η μονάδα αίσθησης αποτελείται από δύο υπομονάδες:

(i) τους αισθητήρες και (ii) τους μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (Analog to Digital Converters ADCs). Τα αναλογικά σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες από την παρατήρηση του εκάστοτε φαινομένου, μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα από τους μετατροπείς ADC και προωθούνται στον μικροεπεξεργαστή. Ο μικροεπεξεργαστής, ο οποίος έχει πρόσβαση στη μονάδα μνήμης, υλοποιεί τις διαδικασίες που καθιστούν τον WS ικανό να επικοινωνεί με άλλους κόμβους και να επιτελεί τις διαδικασίες αίσθησης που του έχουν ανατεθεί. Παραδείγματα από διαθέσιμες πλατφόρμες αισθητήρων αποτελούν η MTS300/400 και η MDA100/300 που χρησιμοποιούνται συνήθως με τα τύπου Mica ασύρματα τμήματα επικοινωνίας. Εναλλακτικά, οι αισθητήρες μπορεί να είναι ολοκληρωμένοι στο τμήμα ασύρματης επικοινωνίας, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση των Telos και SunSPOT.

3. Τη μονάδα προγραμματισμού η οποία παρέχει διεπαφές (interfaces) για την επικοινωνία του WSN με έναν υπολογιστή ή ακόμα και με το δίκτυο μιας επιχείρησης ή βιομηχανίας. Ενδεικτικά, τέτοιες διεπαφές είναι θύρες Ethernet, WiFi, USB. Αυτές οι μονάδες μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε για τον προγραμματισμό της μονάδας ασύρματης επικοινωνίας είτε για τη συλλογή πληροφοριών από αυτήν. Παραδείγματα μονάδων προγραμματισμού αποτελούν οι MIB510, MIB520, MIB600. Με τη μονάδα προγραμματισμού πρέπει να συνδέονται συγκεκριμένες πλατφόρμες προκειμένου να πραγματοποιείται επιτυχώς η φόρτωση της εφαρμογής στην προγραμματιζόμενη μνήμη. Σε άλλες πλατφόρμες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό η ραδιοεπαφή.

Τα βασικά τμήματα ενός WS όπως περιγράφηκαν ανωτέρω παρουσιάζονται στο Σχ. 1.2 (έχει παραλειφθεί η μονάδα προγραμματισμού). Εκτός από αυτά, παρουσιάζονται στα τμήματα που έχουν σχεδιασθεί με διακεκομμένη γραμμή και ορισμένα επιπλέον στοιχεία που ορισμένες φορές συναντώνται σε έναν WS, όπως το Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Location Finding System), το Σύστημα Κίνησης (Mobilizer) και η Γεννήτρια Ισχύος (Power Generator).



Σχήμα 1.2 Τα τμήματα ενός κόμβου-αισθητήρα (WS).

Αν και οι τύποι των αισθητήρων εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία, αφού εξαρτώνται άμεσα από την εκάστοτε εφαρμογή, για τα WSN έχει αναπτυχθεί ένας σχετικά περιορισμένος αριθμός μονάδων ασύρματης επικοινωνίας. Στον Πίν. 1.1 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μονάδων. Στα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνονται η ταχύτητα του επεξεργαστή, το μέγεθος της προγραμματιζόμενης μνήμης και της μνήμης RAM, η φέρουσα συχνότητα για την επικοινωνία και η ταχύτητα μετάδοσης.

Table 1.1 Mote hardware.

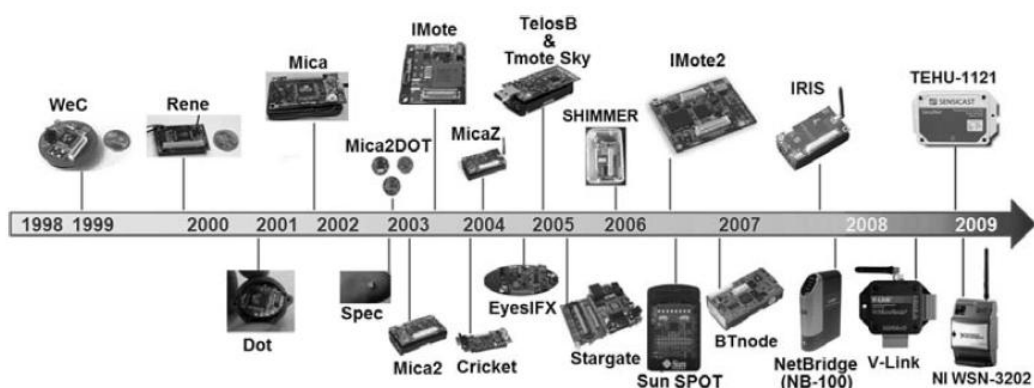
Mote type	CPU speed (MHz)	Prog. mem. (kB)	RAM (kB)	Radio freq. (MHz)	Tx. rate (kbps)
<i>Berkeley</i> [3]					
WeC	8	8	0.5	916	10
rene	8	8	0.5	916	10
rene2	8	16	1	916	10
dot	8	16	1	916	10
mica	6	128	4	868	10/40
mica2	16	128	4	433/868/916	38.4 kbaud
micaz	16	128	4	2.4 GHz	250
Cricket [3]	16	128	4	433	38.4 kbaud
EyesIFX [17]	8	60	2	868	115
TelosB/Tmote [3]	16	48	10	2.4 GHz	250
SHIMMER [16]	8	48	10	BT/2.4 GHz ^a	250
Sun SPOT [9]	16–60	2 MB	256	2.4 GHz	250
BTnode [1]	8	128	64	BT/433–915 ^a	Varies
IRIS [3]	16	128	8	2.4 GHz	250
V-Link [15]	N/A	N/A	N/A	2.4 GHz	250
TEHU-1121 [7]	N/A	N/A	N/A	0.9/2.4 GHz	N/A
NI WSN-3202 [6]	N/A	N/A	N/A	2.4 GHz	250
Imote [3]	12	512	64	2.4 GHz (BT)	100
Imote2 [3]	13–416	32 MB	256	2.4 GHz	250
Stargate [3]	400	32 MB	64 MB SD	2.4 GHz	Varies ^b
Netbridge NB-100 [3]	266	8 MB	32 MB	Varies ^b	Varies ^b

^a BTnode and SHIMMER motes are equipped with two transceivers: Bluetooth and a low-power radio.

^b The transmission rate of the Stargate board and the Netbridge depends on the communication device connected to it (MicaZ node, WLAN card, etc.).

Πίνακας 1.1 Βασικά χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μονάδων ασύρματης επικοινωνίας.

Στο Σχ. 1.3 φαίνεται η χρονική εξέλιξη που αφορά την έναρξη εμπορικής διάθεσης ή εφαρμογής των ανωτέρω μονάδων:



Σχήμα 1.3 Η χρονική εξέλιξη που αφορά την έναρξη εμπορικής διάθεσης ή εφαρμογής των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μονάδων ασύρματης επικοινωνίας.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον Πίν. 1.1 οι δυνατότητες των διαφόρων μονάδων ασύρματης επικοινωνίας εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία. Γενικώς, όμως, οι υπάρχουσες πλατφόρμες είναι δυνατό να χωρισθούν στις low-end πλατφόρμες και στις high-end πλατφόρμες με κριτήριο τις δυνατότητές τους και τη χρήση τους:

1. Low-end πλατφόρμες

Οι πλατφόρμες αυτές χαρακτηρίζονται από περιορισμένες δυνατότητες ως προς την επεξεργασία, τη μνήμη και την εμβέλεια επικοινωνίας. Μεγάλο πλήθος τέτοιων μονάδων χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα WSN με σκοπό να επιτελέσουν λειτουργίες αίσθησης καθώς και για να δημιουργήσουν μία υποδομή για επικοινωνία μέσω multi-hop δικτύωσης. Μονάδες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι συνήθως εφοδιασμένες με μικροεπεξεργαστές και πομποδέκτες χαμηλής ισχύος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται το κόστος αγοράς και η κατανάλωση ενέργειας. Πλατφόρμες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι οι Mica, Telos/Tmote, EYES.

2. High-end πλατφόρμες

Σε ορισμένες εφαρμογές WSN, εκτός από την αίσθηση, την τοπική επεξεργασία και τη multi-hop επικοινωνία, είναι απαραίτητη η διαθεσιμότητα και άλλων λειτουργιών που δεν είναι δυνατό να υποστηριχθούν από low-end πλατφόρμες. Τέτοιου είδους λειτουργία είναι, για παράδειγμα, η διαχείριση του δικτύου. Αυτές οι λειτουργίες απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και μνήμη από αυτές που διαθέτουν οι low-end πλατφόρμες. Επιπλέον, η ανάγκη για επικοινωνία των WSN με άλλα δίκτυα καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ορισμένων κόμβων με δυνατότητες πύλης (gateway). Προκειμένου να αντιμετωπισθούν οι ανάγκες αυτές, έχουν αναπτυχθεί high-end πλατφόρμες για WSN όπως οι Stargate, Imote, Imote2.

Η ποικιλία αυτή στις διαθέσιμες πλατφόρμες για WSN έχει εγείρει ζητήματα συμβατότητας. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η προτυποποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών της επικοινωνίας που οδήγησε στο πρότυπο IEEE 802.15.4 για τα ασύρματα δίκτυα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, μικρής πολυπλοκότητας και υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Αρχικά, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων: περί τα 2.4 GHz παγκοσμίως, περί τα 915 MHz στην Αμερική, περί τα 868 MHz στην Ευρώπη. Επομένως τα περισσότερα WSN λειτουργούν στην ISM (Industrial,

Scientific, Medical) ζώνη συχνοτήτων που παρέχει ελεύθερη χρήση στις περισσότερες χώρες. Επιπλέον, στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιείται διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying) στις ζώνες συχνοτήτων 868/915 MHz και O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz. Το στρώμα MAC (Medium Access Control) παρέχει επικοινωνία για τοπολογία αστέρα (star), δένδρου (tree) και για κατανεμημένη τοπολογία (mesh topology). Η εμβέλεια των WS είναι 10-100 m ενώ ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 20 έως 250 kbps.

Για τα υψηλότερα επίπεδα δικτύου από αυτά που συμπεριλαμβάνονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για προτυποποίηση όπως το Zigbee, το WirelessHART, το WINA και το SP100.11a τα οποία αντιμετωπίζουν τις ανάγκες εφαρμογών συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου. Η προτυποποίηση με βάση το 6LoWPAN αντιμετωπίζει τα θέματα επικοινωνίας μεταξύ των WSN και άλλων δικτύων, όπως το Internet.

Εκτός από τις διάφορες πλατφόρμες που αφορούν το υλικό των WS και που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή, έχει αναπτυχθεί και πληθώρα λογισμικού για τα WSN. Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο λογισμικό είναι το TinyOS, ένα open-source λειτουργικό σύστημα σχεδιασμένο ειδικά για WSN. Το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος λογισμικού για πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι γραμμένο για την πλατφόρμα λογισμικού TinyOS.

1.2 Σχεδιαστικοί παράγοντες στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι δίκτυα που εμφανίζουν ιδιομορφίες και ειδικές ανάγκες οι οποίες αντιμετωπίζονται με εξειδικευμένα πρωτόκολλα και αλγορίθμους. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα WSN.

1. Ανοχή σε σφάλματα-Αξιοπιστία του δικτύου

Κατά τη λειτουργία ενός WSN είναι ενδεχόμενο κάποιοι WS να καταστραφούν ή να τεθούν εκτός λειτουργίας επειδή τελείωσαν τα ενεργειακά τους αποθέματα. Η απώλεια κάποιων WS, ωστόσο, δεν πρέπει να επηρεάσει τη λειτουργία του δικτύου στο σύνολό του. Η ανοχή σε σφάλματα-αξιοπιστία του δικτύου ορίζεται ως η ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετεί τους στόχους του σε περίπτωση αποτυχίας κάποιων WS. Η ανοχή σε σφάλματα ή η

αξιοπιστία ενός συγκεκριμένου κόμβου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω της κατανομής Poisson. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα ενός κόμβου να μην τεθεί εκτός λειτουργίας σε ένα χρονικό διάστημα $(0,t)$ μπορεί να εκφραστεί ως :

$$P_k(t) = e^{-\lambda_k t} \quad (1.1)$$

όπου λ_k είναι ο ρυθμός αποτυχίας του κόμβου k σε ένα χρονικό διάστημα t .

2. Δυνατότητα για κλιμάκωση

Το πλήθος των WS που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρατήρηση ενός φαινομένου είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων. Σε ορισμένες εφαρμογές, ωστόσο, μπορεί το απαιτούμενο πλήθος των WS για την παρατήρηση ενός φαινομένου να φθάσει την τάξη του εκατομμυρίου. Οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι πρέπει να μπορούν να διαχειρίζονται το μεγάλο αυτό πλήθος κόμβων καθώς και να αξιοποιούν τη μεγάλη πυκνότητα με την οποία είναι αναπτυγμένοι στην περιοχή παρατήρησης (βλέπε Κεφ.2). Η πυκνότητα των WS στην υπό παρατήρηση περιοχή μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$\mu(R) = \frac{N\pi R^2}{A} \quad (1.2)$$

όπου N είναι το πλήθος των WS σε μια περιοχή εμβαδού A και R είναι η εμβέλεια των WS. Όπως είναι φανερό, η πυκνότητα εκφράζει το πλήθος των WS εντός της εμβέλειας κάθε κόμβου σε μία περιοχή A .

3. Κόστος Κατασκευής

Καθώς τα WSN αποτελούνται από μεγάλο πλήθος WS, το κόστος κάθε κόμβου καθορίζει το συνολικό κόστος του δικτύου. Αν το κόστος ενός WSN υπερβαίνει το κόστος παρακολούθησης ενός φαινομένου με συμβατικούς αισθητήρες, η υλοποίηση του WSN δεν έχει νόημα. Επομένως, το κόστος κατασκευής κάθε κόμβου πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Πρακτικά αναφέρεται ότι το κόστος παραγωγής ενός WS πρέπει να είναι αρκετά χαμηλότερο από 1US \$ ώστε η εγκατάσταση ενός WSN να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

4. Κατασκευαστικοί Περιορισμοί

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2 τα βασικά στοιχεία ενός WS είναι η μονάδα αίσθησης, ο μικροεπεξεργαστής, ο πομποδέκτης και η μονάδα παροχής ενέργειας. Από τα στοιχεία αυτά, η μονάδα παροχής ενέργειας καθορίζει σε

μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του δικτύου. Συνήθως, η δυνατότητα τροφοδότησης του κόμβου με ενέργεια είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα τα επικοινωνιακά πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι για τα WSN να πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι WS να μην καταναλώνουν πολλή ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτή η ανάγκη μπορεί να μην είναι επιτακτική επειδή η μονάδα παροχής ενέργειας υποστηρίζεται από γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα συλλέκτες ηλιακής ενέργειας. Ακόμα, ένας WS μπορεί να διαθέτει Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Location Finding System) και Σύστημα Κίνησης (Mobilizer). Το Σύστημα Εντοπισμού Θέσης είναι απαραίτητο όταν οι διαδικασίες αίσθησης απαιτούν ακριβή γνώση της θέσης κάθε κόμβου. Το σύστημα κίνησης είναι απαραίτητο όταν για την αποτελεσματική λειτουργία οι θέσεις των WS πρέπει να είναι συγκεκριμένες.

Ωστόσο, όλα αυτά τα στοιχεία πρέπει να χωρούν σε μία διάταξη με μέγεθος το πολύ ένα κυβικό εκατοστό. Η διάταξη αυτή πρέπει να καταναλώνει χαμηλή ενέργεια, να αντέχει σε υψηλές ογκομετρικές πιέσεις, να είναι αυτόνομη και να προσαρμόζεται στο περιβάλλον.

5. Τοπολογία του WSN

Εκατοντάδες έως χιλιάδες κόμβων αναπτύσσονται στην περιοχή παρατήρησης. Η ανάπτυξη ενός μεγάλου πλήθους κόμβων σε υψηλή πυκνότητα απαιτεί προσεκτική διαχείριση της τοπολογίας που πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις:

- Φάση πριν και κατά την τοποθέτηση:
Οι WS μπορούν είτε να διασκορπισθούν μαζικά είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας στην περιοχή παρατήρησης. Για παράδειγμα, η ανάπτυξή τους μπορεί να γίνει με ρίψη από ένα αεροπλάνο ή με τη μεταφορά τους με πύραυλο και τη συστηματική τοποθέτηση από κάποιον άνθρωπο ή ρομπότ.
- Φάση μετά την τοποθέτηση
Μετά την τοποθέτηση, οι ενδεχόμενες αλλαγές στην τοπολογία οφείλονται σε μετακίνηση κάποιων WS ή στην αποτυχία κάποιων κόμβων λόγω βλάβης ή ανεπάρκειας ενέργειας.
- Φάση επανατοποθέτησης ορισμένων κόμβων

Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιτρέπεται η τοποθέτηση νέων, πρόσθετων κόμβων για την αντικατάσταση παλαιότερων που τέθηκαν εκτός λειτουργίας ή για την αντιμετώπιση νέων λειτουργιών από το WSN.

6. Περιβάλλον

Οι WS πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν χωρίς επίβλεψη σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Μπορεί να λειτουργούν στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος, στον πυθμένα της θάλασσας, σε μία χημικά μολυσμένη περιοχή, σε ένα πεδίο μάχης, αλλά, και σε μία κατοικία ή σε ένα μεγάλο κτήριο.

7. Μέσο Μετάδοσης

Στα WSN οι WS επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κάποιου ασύρματου μέσου μετάδοσης. Οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των WS μπορεί να είναι ραδιοζεύξεις, ζεύξεις υπέρυθρης ακτινοβολίας ή ζεύξεις ορατής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται και στον Πίν. 1.1, το υλικό που έχει κατασκευασθεί για τους WS λειτουργεί, στην πλειοψηφία του, στις ραδιοσυχνότητες. Η χρήση υπέρυθρης ή ορατής ακτινοβολίας απαιτεί ζεύξεις οπτικής επαφής (line of sight). Το βασικό πλεονέκτημα της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ότι δεν εμφανίζει φαινόμενα παρεμβολής με ηλεκτρονικά. Ενδιαφέρουσα εφαρμογή με ζεύξεις ορατής ακτινοβολίας είναι το σύστημα Smart Dust.

8. Κατανάλωση Ενέργειας

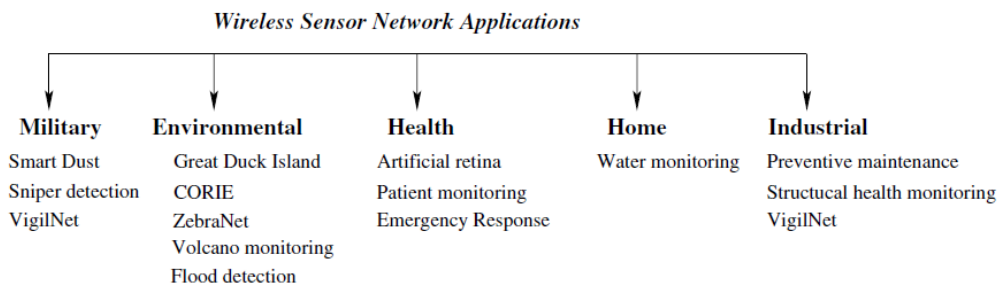
Ως μικροηλεκτρονικές συσκευές οι WS μπορούν να εφοδιασθούν με μία περιορισμένη μπαταρία (ηλεκτρικό φορτίο: 0.5 Ah και τάση:1.2V). Συχνά, ο ανεφοδιασμός των ενεργειακών αποθεμάτων είναι αδύνατος. Επομένως, η διάρκεια ζωής ενός WS εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του. Σε ένα WSN κάθε WS λειτουργεί ταυτόχρονα ως πηγή και ως δρομολογητής δεδομένων. Η λανθασμένη λειτουργία ή, ακόμα χειρότερα, η διακοπή λειτουργίας κάποιων κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στην τοπολογία των WSN με αποτέλεσμα να χρειασθεί επαναδρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Είναι, επομένως, φανερό η ανάγκη για αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση του δικτύου. Για τον λόγο αυτό στα WSN οι αλγόριθμοι για την επικοινωνία και για την επεξεργασία δεδομένων έχουν ως κριτήριο αποτελεσματικότητας τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

1.3 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται μία σύντομη παρουσίαση των υπάρχουσών εμπορικών και ερευνητικών εφαρμογών των WSN. Ως επί το πλείστον οι εφαρμογές αυτές είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

1. Περιβαλλοντικές Εφαρμογές
2. Εφαρμογές για την Υγεία
3. Οικιακές Εφαρμογές
4. Βιομηχανικές Εφαρμογές
5. Στρατιωτικές Εφαρμογές

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών για εκάστη των κατηγοριών αυτών.



Σχήμα 1.4 Μία κατηγοριοποίηση των εφαρμογών των WSN

1.3.1 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Τα WSN έχουν χρησιμοποιηθεί για μεγάλο εύρος περιβαλλοντικών εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν:

- τον εντοπισμό πτηνών, μικρών ζώων, εντόμων κ .λ. π.
- την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών που μπορεί να επηρεάσουν τη χλωρίδα και την πανίδα
- την άρδευση
- μηχανήματα για την απομακρυσμένη παρακολούθηση πλανητών
- την ανίχνευση χημικών ουσιών
- την παρακολούθηση των κλιματολογικών και άλλων συνθηκών που επηρεάζουν τη γεωργία
- την περιβαλλοντική και βιολογική παρακολούθηση υδάτων, εδάφους και ατμόσφαιρας
- την έγκαιρη ανίχνευση δασικών πυρκαγιών

- την υποβοήθηση της έρευνας για τη Μετεωρολογία και τη Γεωφυσική
- την έγκαιρη ανίχνευση πλημμύρων
- τη χαρτογράφηση της βιοποικιλότητας
- τη μελέτη της μόλυνσης

1.3.2 Εφαρμογές για την Υγεία

Τα WSN έχουν βρει πρόσφατα εφαρμογή και στη βιοϊατρική. Αυτό έχει γίνει δυνατό με την ανάπτυξη εμφυτεύσιμων βιοϊατρικών διατάξεων με ενσωματωμένους αισθητήρες. Τέτοιες εφαρμογές αποτελούν:

- Η ανάπτυξη τεχνητού αμφιβληστροειδούς
- Η συνεχής παρακολούθηση ασθενών
- Η έγκαιρη διάγνωση
- Η χορήγηση φαρμάκων σε νοσοκομεία
- Η παρακολούθηση φυσιολογικών διαδικασιών οργανισμών
- Ο εντοπισμός και η παρακολούθηση των ασθενών και των ιατρών σε νοσοκομεία

1.3.3 Οικιακές Εφαρμογές

Με την πρόοδο της τεχνολογίας έχει γίνει πλέον εφικτή η ενσωμάτωση WS σε οικιακές συσκευές. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι για παράδειγμα η ηλεκτρική σκούπα, ο φούρνος μικροκυμάτων, το ψυγείο, στερεοφωνικά συστήματα ή ακόμα και συστήματα για τον έλεγχο της κατανάλωσης νερού. Αυτοί οι ενσωματωμένοι WS είναι δυνατό να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς και με άλλα, εξωτερικά δίκτυα μέσω του Internet. Οι οικιακές εφαρμογές των WSN αποσκοπούν στο να επιτρέψουν στους χρήστες τους την ευκολότερη και από απόσταση διαχείριση των οικιακών συσκευών.

1.3.4 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Στη βιομηχανία είναι συχνά επιθυμητό να επιτελούνται εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου για τον εξοπλισμό ή για τα προϊόντα. Συχνά, η παρακολούθηση αυτή υλοποιείται κατά χειροκίνητο τρόπο από εξειδικευμένο προσωπικό. Δηλαδή, εξειδικευμένοι επαγγελματίες μετρούν τις παραμέτρους που ενδιαφέρουν και τις προωθούν για ανάλυση σε έναν κεντρικό επεξεργαστή. Τα μειονεκτήματα της χειροκίνητης υλοποίησης είναι η ανάγκη για προσωπικό και η χαμηλή ακρίβεια των μετρήσεων. Ακόμα, έχουν χρησιμοποιηθεί Ενσύρματα Δίκτυα Αισθητήρων για τις λειτουργίες αυτές.

Ωστόσο, το κόστος της εγκατάστασης τέτοιων δικτύων είναι σχετικά υψηλό. Επιπλέον, το κόστος για την αναβάθμιση τέτοιων δικτύων είναι πρακτικά ίσο με το κόστος για την εγκατάσταση ενός νέου συστήματος εξ αρχής. Τα WSN, που χαρακτηρίζονται από ευκολία στην εγκατάσταση και την κλιμάκωση καθώς και από μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, φαίνεται να αποτελούν ιδανική εναλλακτική λύση για την υλοποίηση παρακολούθησης και ελέγχου στη βιομηχανία. Ορισμένες από τις εφαρμογές των WSN στη βιομηχανία είναι οι εξής:

- Παρακολούθηση καταπόνησης εξοπλισμού
- Διαχείριση αποθεμάτων
- Έλεγχος της ποιότητας του προϊόντος
- Κατασκευή ευφυών χώρων εργασίας
- Ενεργειακός έλεγχος μεγάλων κτιρίων
- Έλεγχος ρομπότ σε περιβάλλοντα αυτοματοποιημένης λειτουργίας
- Έλεγχος και αυτοματισμός της διαδικασίας παραγωγής
- Παρακολούθηση περιοχών όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανισθούν καταστροφές
- Εντοπισμός και παρακολούθηση οχημάτων

1.3.5 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Η εύκολη και ταχεία εγκατάσταση των WSN καθώς και οι ιδιότητές τους για αυτό-οργάνωση και ανοχή σε απώλειες WS, τα καθιστούν κατάλληλα για στρατιωτικές εφαρμογές. Παραδείγματα στρατιωτικών εφαρμογών των WSN αποτελούν

- η παρακολούθηση του εξοπλισμού και των πυρομαχικών
- η επιτήρηση του πεδίου μάχης
- η αναγνώριση αντίπαλων δυνάμεων
- η σκοποβολή
- η εκτίμηση καταστροφών
- ο εντοπισμός και η αναγνώριση πυρηνικών, βιολογικών ή χημικών επιθέσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΧΩΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΟΜΒΩΝ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των WS σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του υπό παρατήρηση φυσικού φαινομένου εισάγουν χωρικές και χρονικές συσχετίσεις των μετρήσεων των WSN. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των συσχετίσεων στα WSN έχουν ως εξής:

- Χωρικές Συσχετίσεις: Τυπικές εφαρμογές των WSN απαιτούν την τοποθέτηση των WS με μεγάλη πυκνότητα προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής κάλυψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικός αριθμός αισθητήρων να καταγράφουν πληροφορίες για συγκεκριμένο φαινόμενο στην περιοχή παρατήρησης. Λόγω της μεγάλης πυκνότητας της τοπολογίας, οι μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ενδεχομένως είναι συσχετισμένες σε μεγάλο βαθμό. Ο βαθμός συσχέτισης αυξάνεται με τη μείωση της απόστασης μεταξύ των WS.
- Χρονικές Συσχετίσεις: Κάποιες από τις εφαρμογές των WSN απαιτούν οι κόμβοι να μετρούν και να αποστέλλουν τις μετρήσεις τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Τέτοιες εφαρμογές χαρακτηρίζονται ως εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης. Η φύση ωστόσο του παρατηρούμενου φαινομένου εισάγει χρονική συσχέτιση μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ενός WS. Ο βαθμός συσχέτισης εξαρτάται δραστικά από τον τρόπο που μεταβάλλεται με το χρόνο το υπό παρατήρηση φυσικό φαινόμενο.

Συχνά οι συσχετίσεις αυτές αξιοποιούνται προκειμένου να αναπτυχθούν αλγόριθμοι και πρωτόκολλα επικοινωνίας κατάλληλα για να αντιμετωπισθούν οι ιδιαιτερότητες των WSN. Για παράδειγμα, διαισθητικά, λόγω της χωρικής συσχέτισης, δεδομένα από απομακρυσμένους κόμβους είναι περισσότερο χρήσιμα για τον κόμβο-συλλέκτη σε σχέση με δεδομένα από γειτονικούς κόμβους που εμφανίζουν μεγάλη συσχέτιση. Επομένως, μπορεί να μην είναι απαραίτητο κάθε WS να προωθήσει τα δεδομένα του προς τον κόμβο-συλλέκτη. Αντίθετα, ένας μικρός αριθμός μετρήσεων από απομακρυσμένους κόμβους ενδέχεται να είναι επαρκής για να αποδοθεί με αποδεκτό βαθμό αξιοπιστίας το υπό παρατήρηση φαινόμενο. Παρομοίως, σε περιπτώσεις

εφαρμογών συνεχούς παρακολούθησης η συχνότητα αναφοράς στον κόμβο-συλλέκτη είναι δυνατό να προσαρμοστεί έτσι ώστε το χρονικά συσχετισμένο υπό παρατήρηση σήμα να αποδίδεται με ελεγχόμενη προσέγγιση. Τα δύο αυτά παραδείγματα επιφέρουν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αφού οι WS αποφεύγουν ορισμένες εκπομπές μετρήσεων. Οι ασύρματες μεταδόσεις είναι από τις πλέον ενεργειακά δαπανηρές λειτουργίες των κόμβων. Επομένως, είναι φανερό το όφελος από την αξιοποίηση της συσχέτισης ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη ενεργειακή απόδοση των WSN.

2.1 Στοχαστικές Ανελιξίες και Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Είναι φανερό ότι τα σήματα που καταγράφονται από τους WS ενός WSN είναι τυχαία. Οπότε, μπορούν να περιγραφούν μαθηματικά ως στοχαστικές ανελιξίες. Συνήθως, τα σήματα αυτά περιγράφονται ως στοχαστικές ανελιξίες της μορφής $X(t,x,y)$. Τότε, οι μετρήσεις του i -οστού κόμβου στη θέση (x_i, y_i) στο δίκτυο συμβολίζονται υπό τη μορφή $X(t, x_i, y_i)$. Με χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα για το Κεφ. 2 είναι δυνατό να εξετασθούν οι χρονικές συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων ενός WS σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Για παράδειγμα, για μία διαδικασία $X(x,y,t)$ υπό δεδομένο (x,y) η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ορίζεται ως:

$$R_X(t_k, t_i) = E[X(t_k), X(t_i)] \quad (2.1)$$

Η συνάρτηση αυτή αποδίδει τη χρονική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων ενός WS κατά τις χρονικές στιγμές t_k και t_i .

Λαμβάνοντας στιγμιότυπα από τις μετρήσεις των αισθητήρων είναι δυνατό να εξετασθούν οι χωρικές συσχετίσεις με χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Για παράδειγμα, για μία διαδικασία $X(x,y,t)$ για δεδομένο t , η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ορίζεται ως:

$$R(d_1, d_2) = E[X(x, y)X(x + d_1, y + d_2)] \quad (2.2)$$

Η συνάρτηση αυτή δίνει τη χωρική συσχέτιση των μετρήσεων δύο WS σε απόσταση \vec{d} μεταξύ τους για δεδομένη χρονική στιγμή. Το μέτρο του \vec{d} υπολογίζεται από τα d_1 και d_2 .

Το μαθηματικό υπόδειγμα για την πληροφορία που συλλέγεται από ένα WSN με N WS απεικονίζεται στο Σχ. 2.1. Ο κόμβος-συλλέκτης ενδιαφέρεται να εκτιμήσει το παρατηρούμενο σήμα S με χρήση των WS n_i $i=1,2,\dots,N$ που είναι διασπαρμένοι στην περιοχή παρατήρησης. Κάθε WS n_i στη θέση (x_i, y_i) μετρά $X_i[n]$. Το $X_i[n]$ είναι η θορυβώδης μέτρηση του παρατηρούμενου σήματος $S_i[n]$, δηλαδή $X_i[n] = S_i[n] + N_i[n]$. Το $S_i[n]$ είναι η στοχαστική διαδικασία για $t = t_n$ και $(x, y) = (x_i, y_i)$. Το $N_i[n]$ είναι ο θόρυβος που προστίθεται στην παρατήρηση κάθε WS. Συχνά, θεωρείται ότι $\{N_i[n]\}_n$ αποτελεί ακολουθία ανεξάρτητων και ομοιόμορφα κατανομημένων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν κατανομή Gauss με μέση τιμή 0 και διασπορά σ_N^2 . Επιπλέον, συχνά θεωρείται ότι ο θόρυβος που προστίθεται στις μετρήσεις ενός αισθητήρα είναι ανεξάρτητος από αυτόν που προστίθεται στις μετρήσεις οποιουδήποτε άλλου αισθητήρα. Δηλαδή τα $N_i[n]$ και $N_j[n]$ είναι τυχαίες μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους για κάθε $i \neq j$ και για κάθε n .

Κάθε WS πριν μεταδώσει τη μέτρησή του, την κωδικοποιεί. Η κωδικοποίηση αυτή μπορεί να περιγραφεί υπό τη μορφή

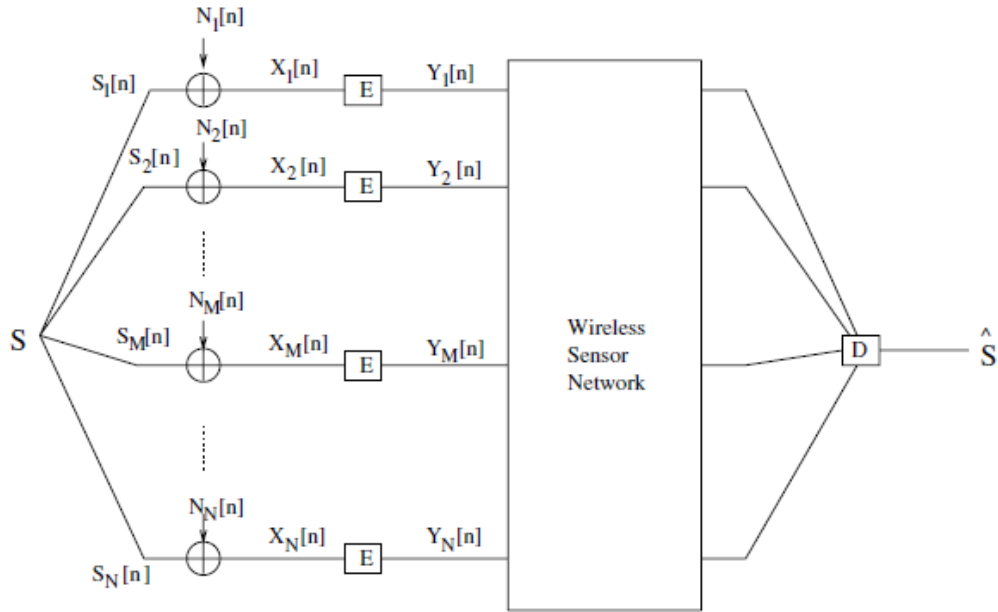
$$Y_i[n] = f_i(X_i[n]) \quad (2.3)$$

Στη συνέχεια, το κωδικοποιημένο σήμα $Y_i[n]$ προωθείται στον κόμβο-συλλέκτη με multi-hop επικοινωνία μέσω του WSN. Ο κόμβος-συλλέκτης, λαμβάνει τις μετρήσεις των WS και τις χρησιμοποιεί για να αναπαράγει το S . Η εκτίμηση του S από τον κόμβο-συλλέκτη συμβολίζεται με \hat{S} . Για ένα χρονικό διάστημα παρατήρησης $\tau = t_{n_\tau} - t_{n_1}$ ισχύει:

$$\hat{S} = g(Y_1[n_1], \dots, Y_1[n_\tau]; Y_N[n_1], \dots, Y_N[n_\tau]) \quad (2.4)$$

Οι κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές συμβολίζονται ως E και D , αντίστοιχα, ενώ η παραμόρφωση που έχει υποστεί το αρχικό σήμα από την παρατήρηση του φαινομένου συμβολίζεται ως:

$$D = E[d(S, \hat{S})] \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.1 Η αρχιτεκτονική του μαθηματικού υποδείγματος για τις συσχετίσεις.

2.2 Μαθηματική Διατύπωση των Χωρικών και Χρονικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Με βάση το μοντέλο για τη συλλογή πληροφοριών από ένα WSN που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, παρουσιάζονται στη συνέχεια μαθηματικά πρότυπα των χωρικών και των χρονικών συσχετίσεων σε WSN.

2.2.1 Μαθηματική Διατύπωση των Χωρικών Συσχετίσεων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Καθώς στην παράγραφο αυτή θα εξετασθούν μόνο οι χωρικές συσχετίσεις, στην ανάλυση που ακολουθεί είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι τα δείγματα είναι χρονικά ανεξάρτητα. Επομένως, παραλείποντας το δείκτη n , μπορεί να γραφεί:

$$X_i = S_i + N_i, i = 1, \dots, N \quad (2.6)$$

Ο κόμβος-συλλέκτης ενδιαφέρεται για την αναπαραγωγή του αρχικού σήματος S του υπό παρατήρηση φαινομένου, με βάση τις χωρικά συσχετισμένες παρατηρήσεις S_i των WS n_i στις θέσεις (x_i, y_i) . Το υπό παρατήρηση φυσικό φαινόμενο είναι δυνατό να παρασταθεί ως σύνολο N τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν από κοινού την κατανομή Gauss.

Η μέση τιμή και η μεταβλητότητα κάθε τυχαίας μεταβλητής S_i είναι $E\{S_i\} = 0$ και $var\{S_i\} = \sigma_S^2, i = 1, \dots, N$, αντίστοιχα.

Η συµµεταβλητότητα (covariance) δύο τυχαίων µεταβλητών S_i, S_j είναι ίση µε

$$cov\{S_i, S_j\} = \sigma_S^2 corr\{S_i, S_j\} \quad (2.7)$$

όπου

$$corr\{S_i, S_j\} = \rho_{i,j} = K_\theta(d_{i,j}) = \frac{E[S_i S_j]}{\sigma_S^2} \quad (2.8)$$

ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient) των τυχαίων µεταβλητών S_i και S_j . Το $d_{i,j}$ υποδηλώνει την απόσταση µεταξύ των κόµβων n_i και n_j . Τα συνήθως χρησιµοποιούµενα µοντέλα για χωρικές συσχετίσεις είναι τα εξής:

- Σφαιρικό µοντέλο

$$K_\theta^S(d) = \begin{cases} 1 - \frac{3d}{2\theta_1} + \frac{1}{2}\left(\frac{d}{\theta}\right)^3, & 0 \leq d \leq \theta_1 \\ 0, & d > \theta_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Στο µοντέλο αυτό οι µετρήσεις δύο κόµβων σε απόσταση µεγαλύτερη από θ_1 µεταξύ τους είναι ασυσχέτιστες.

- Μοντέλο εκθετικού υψωµένου σε δύναµη

$$K_\theta^{PE}(d) = e^{-\left(\frac{d}{\theta_1}\right)^{\theta_2}}, \theta_1 > 0, \theta_2 \in (0, 2] \quad (2.10)$$

- Μοντέλο Δευτεροβάθµιας Ρητής Συνάρτησης

$$K_\theta^{RQ}(d) = \left(1 + \left(\frac{d}{\theta_1}\right)^2\right)^{-\theta_2}, \theta_1 > 0, \theta_2 > 0 \quad (2.11)$$

- Μοντέλο Matérn

$$K_\theta^M(d) = \frac{1}{2^{\theta_2-1}\Gamma(\theta_2)} \left(\frac{d}{\theta_1}\right)^{\theta_2} \mathcal{K}_{\theta_2}\left(\frac{d}{\theta_1}\right), \theta_1 > 0, \theta_2 > 0 \quad (2.12)$$

όπου $\mathcal{K}_{\theta_2}(\cdot)$ είναι η τροποποιηµένη συνάρτηση Bessel τάξης θ_2 .

Το εκάστοτε µοντέλο για τις χωρικές συσχετίσεις επιλέγεται µε βάση τα χαρακτηριστικά του υπό παρατήρηση φυσικού φαινοµένου.

Οι εκτιμήσεις \hat{S}_i του αποκωδικοποιητή του Σχ. 2.1 για τα S_i είναι χωρικά συσχετισµένες, αφού και τα S_i είναι χωρικά συσχετισµένα. Εποµένως, οι χωρικές συσχετίσεις εισάγουν πλεονασµό στην πληροφορία που φθάνει στον κόµβο-συλλέκτη. Ενδέχεται, εποµένως, να είναι δυνατό να ανακατασκευαστεί το σήµα µε ανεκτή απόκλιση χρησιµοποιώντας µετρήσεις που λαµβάνονται από M µόνο εκ των N WS ($M < N$). Είναι φανερό ότι η λύση αυτή οδηγεί σε χαµηλότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο WSN αφού αποφεύγονται οι µεταδόσεις των µετρήσεων $N-M$ WS. Η απόκλιση που προκαλείται κατά την αναπαραγωγή του αρχικού σήµατος

εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του υπό παρατήρηση φαινομένου άρα και του σήματος S και του υπερτιθέμενου θορύβου καθώς και από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση. Είναι πλέον σαφές το πώς είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι χωρικές συσχετίσεις για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και επικοινωνιακών πρωτοκόλλων για τα WSN.

2.2.2 Μαθηματική Διατύπωση των Χρονικών Συσχετίσεων σε Δίκτυα Αισθητήρων

Σε περιπτώσεις εφαρμογών συνεχούς παρακολούθησης, οι WS πραγματοποιούν περιοδικές μετρήσεις. Οι διαδοχικές μετρήσεις κάθε WS είναι χρονικά συσχετισμένες. Καθώς στην παράγραφο αυτή θα εξετασθούν μόνο οι χρονικές συσχετίσεις, στην ανάλυση που ακολουθεί είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι τα δείγματα είναι χρονικά ανεξάρτητα. Κάθε WS μετρά τη θορυβώδη εκδοχή του σήματος:

$$X[n] = S[n] + N[n] \quad (2.13)$$

Αυτό που ενδιαφέρει είναι η εκτίμηση του σήματος $s(t)$ για ένα διάστημα απόφασης ίσο με τ . Το διάστημα απόφασης τ είναι δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου ο κόμβος-συλλέκτης ενδιαφέρεται να εκτιμήσει το σήμα $s(t)$ του υπό παρατήρηση φαινομένου. Στη θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί εισάγεται ένα μέτρο (metric) της παραμόρφωσης της εκτίμησης του σήματος στον κόμβο-συλλέκτη όπου θεωρείται ότι όλη η πληροφορία από το WSN παράγεται από ένα μοναδικό WS κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος τ . Ας υποθεθεί ότι οι μετρήσεις αποστέλλονται στον κόμβο-συλλέκτη με συχνότητα f_0 και ότι το παρατηρούμενο σήμα είναι τυχαία διαδικασία Gauss με μέση τιμή 0 και μεταβλητότητα σ_s^2 . Ο κόμβος-συλλέκτης ενδιαφέρεται να εκτιμήσει την αναμενόμενη τιμή του $s(t)$ στο διάστημα απόφασης τ , δηλαδή ενδιαφέρεται να προσδιορίσει το $S(\tau)$. Θεωρώντας ότι το παρατηρούμενο σήμα $s(t)$ είναι μία στατική υπό την ευρεία έννοια τυχαία διαδικασία, η αναμενόμενη τιμή του στο διάστημα απόφασης τ είναι δυνατό να υπολογισθεί από το χρονικό μέσο όρο. Δηλαδή:

$$S(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} s(t) dt \quad (2.14)$$

όπου t_0 είναι η χρονική στιγμή όπου ο WS μεταβαίνει σε ενεργή κατάσταση προκειμένου να λάβει ένα δείγμα του σήματος. Με την αλλαγή μεταβλητών $\Gamma = t - t_0$ προκύπτει:

$$S(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} s(t_0 + \Gamma) d\Gamma \quad (2.15)$$

Ορίζοντας την τιμή του σήματος σε κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας ως

$$S[n] = s\left(t_0 + \frac{n}{f_0}\right) \quad (2.16)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα δειγματοληψίας και $S[n]$ είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν από κοινού κατανομή Gauss με μέση τιμή 0 και μεταβλητότητα σ_s^2 . Δηλαδή:

$$E\{S[n]\} = 0 \quad (2.17)$$

και

$$E\{(S[n])^2\} = \sigma_s^2 \quad (2.18)$$

Ακόμα, η συμμεταβλητότητα (covariance) των $S[n]$, $S[m]$ είναι:

$$E\{S[n]S[m]\} = \sigma_s^2 \hat{\rho}_s(n, m) \quad (2.19)$$

και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της στοχαστικής ανάλιξης $s(t)$ είναι

$$E\{s(t)s(t + \delta)\} = \sigma_s^2 \rho_s(\delta) \quad (2.20)$$

όπου

$$\hat{\rho}_s(n, m) = \rho_s\left(\frac{|m-n|}{f}\right) \quad (2.21)$$

ο συντελεστής συσχέτισης που εξαρτάται από τη χρονική διαφορά μεταξύ δειγμάτων.

Αν και ο συντελεστής συσχέτισης είναι δυνατό να εκφραστεί υπό μορφή κοινή για όλα τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο εδ.2.2.1, συνήθως τα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται, όπως για παράδειγμα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, είναι δυνατό να περιγραφούν ως στοχαστικές ανελίξεις με εκθετική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Επομένως, συνήθως χρησιμοποιείται ως συντελεστής συσχέτισης ο ακόλουθος:

$$\rho_s(\delta) = e^{-|\delta|/\theta_1} \quad (2.22)$$

Η παραμόρφωση που εισάγεται κατά την εκτίμηση του σήματος στο διάστημα απόφασης τ εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας των κόμβων.

Συγκεκριμένα, η παραμόρφωση μειώνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα δειγματοληψίας. Επομένως υπό συγκεκριμένο περιορισμό ως προς τη μέγιστη

αποδεκτή παραμόρφωση, είναι δυνατό να επιλεγεί η ελάχιστη απαιτούμενη συχνότητα δειγματοληψίας. Ελαχιστοποίηση της συχνότητας δειγματοληψίας των κόμβων συνεπάγεται ελαχιστοποίηση των πακέτων που μεταδίδονται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Είναι πλέον σαφές το πώς είναι δυνατό να αξιοποιηθούν οι χρονικές συσχετίσεις για ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και επικοινωνιακών πρωτοκόλλων για WSN.

2.3 Αξιοποίηση των Χωρικών και Χρονικών Συσχετίσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Όπως εξηγήθηκε ήδη στα εδ.2.2.1 και 2.2.2 είναι δυνατό να αξιοποιηθούν οι χωρικές και οι χρονικές συσχετίσεις για την ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών ενεργειακά αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για WSN. Η εκτενής παρουσίαση τέτοιων πρωτοκόλλων εκφεύγει του πλαισίου αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στις αναφορές [5], [6], [7],[8], [9].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Η ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι WS είναι μικρές, φθηνές διατάξεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των WS, και κατ' επέκταση του WSN, είναι δυνατό να επιμηκυνθεί με την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών επικοινωνιακών πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Δηλαδή τα επικοινωνιακά πρωτόκολλα πρέπει να είναι σχεδιασμένα με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των περιορισμένων πηγών ενέργειας και υπολογιστικών δυνατοτήτων των WS. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η υλοποίηση Συνάθροισης Δεδομένων (Data Aggregation) στα WSN. Η τεχνική της συνάθροισης δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πληροφορίας που διακινείται στο WSN, με κόστος τη μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα στους WS. Ωστόσο, επειδή η μέση ενέργεια που καταναλώνεται για την επεξεργασία της πληροφορίας είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτήν για την ασύρματη μετάδοση πληροφορίας, η συνάθροιση δεδομένων κατά τη συλλογή πληροφορίας από ένα WSN, μπορεί να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποδοτική χρήση των πηγών ενέργειας, η έγκαιρη παράδοση των πληροφοριών στον κόμβο-συλλέκτη και η ακρίβεια των συλλεγόμενων πληροφοριών είναι στόχοι οι οποίοι έρχονται σε αντιπαράθεση μεταξύ τους. Ο βέλτιστος συμβιβασμός (trade-off) ως προς την επίτευξη των στόχων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή.

Στις πρώτες υλοποιήσεις της, η συνάθροιση των δεδομένων αφορούσε μόνο τρόπους δρομολόγησης και ταυτόχρονα συνάθροισης των δεδομένων που προέρχονταν από διαφορετικές πηγές, αλλά είχαν τον ίδιο προορισμό. Δηλαδή, αρχικά, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που πραγματοποιούσαν συνάθροιση δεδομένων ήταν απλώς αλγόριθμοι δρομολόγησης και διέφεραν ως προς τους παραδοσιακούς αλγόριθμους δρομολόγησης μόνο ως προς τον τρόπο που γινόταν η επιλογή της διαδρομής. Ωστόσο, πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί νέοι μηχανισμοί για την αποδοτικότερη περιγραφή και σύμπτυξη των δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνάθροιση των δεδομένων αποτελεί σύνθετη διαδικασία που αφορά πολλά επίπεδα της στοίβας των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

3.1 Βασικά Στοιχεία της Συνάθροισης Δεδομένων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Σε τυπικές εφαρμογές WSN συλλέγονται δεδομένα από τους WS και προωθούνται σε κάποιον κεντρικό, υπολογιστικά ισχυρό κόμβο. Εκεί τα δεδομένα αναλύονται, υφίστανται επεξεργασία και γίνονται αξιοποιήσιμα από την εφαρμογή. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα δεδομένα που παράγονται από διαφορετικούς αισθητήρες είναι δυνατό να υφίστανται από κοινού επεξεργασία καθώς προωθούνται προς τον κόμβο-συλλέκτη. Συνάθροιση είναι η διαδικασία που πραγματοποιεί την κατανεμημένη επεξεργασία της πληροφορίας στο δίκτυο. Η πραγματοποίηση συνάθροισης στα WSN επιφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας αφού είναι δυνατό να μειωθεί αισθητά το πλήθος των εκπομπών ή το μήκος των πακέτων μετάδοσης. Φυσικά, η μείωση του μεγέθους των δεδομένων όπως προκύπτει από τη διαδικασία της συνάθροισης δεν πρέπει να εκτελείται κατά μη ελεγχόμενο τρόπο. Είναι απαραίτητο να μην αποκρύπτονται ή αλλοιώνονται στατιστικά χαρακτηριστικά της παρακολουθούμενης στοχαστικής διαδικασίας.

Με βάση όσα έχουν εξηγηθεί μέχρι το σημείο αυτό, η συνάθροιση δεδομένων ορίζεται ως εξής:

Η συνάθροιση δεδομένων εντός ενός δικτύου είναι διαδικασία που αφορά τη συλλογή και τη δρομολόγηση της πληροφορίας σε ένα multi-hop δίκτυο καθώς και την επεξεργασία της πληροφορίας σε ενδιάμεσους κόμβους με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης των (ενεργειακών κυρίως) αποθεμάτων και την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Ο βαθμός συνάθροισης (d) ορίζεται ως ο λόγος των μηνυμάτων που εξέρχονται προς το λόγο των μηνυμάτων που εισέρχονται σε ένα κόμβο.

Συνήθως, η συνάθροιση πραγματοποιείται με κάποιο από τους δύο τρόπους:

- Συνάθροιση με μείωση του όγκου των δεδομένων: Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία της συνάθροισης αφορά το συνδυασμό και ταυτόχρονα τη συμπίεση των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές με στόχο τη μείωση της πληροφορίας που εκπέμπεται συνολικά στο δίκτυο. Για παράδειγμα, έστω ένας WS που λαμβάνει δύο πακέτα από δύο διαφορετικές πηγές που περιέχουν ως πληροφορία μετρήσεις θερμοκρασίας. Αντί για την

προώθηση των δύο αυτών πακέτων, ο WS μπορεί να υπολογίσει το μέσο όρο των δύο μετρήσεων και να τον αποστείλει σε ένα πακέτο.

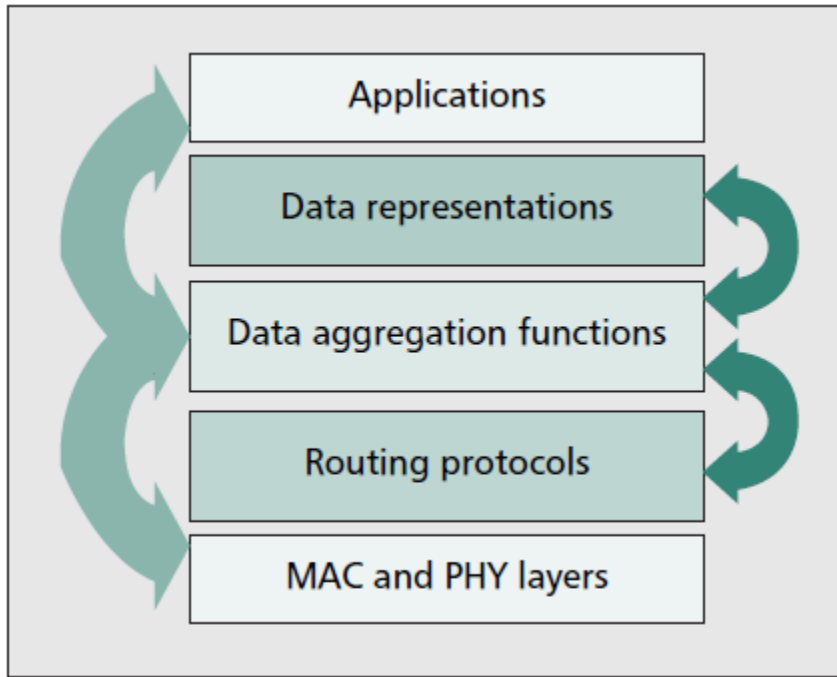
- Συνάθροιση χωρίς μείωση του όγκου των δεδομένων: Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία της συνάθροισης αφορά τη συνάθροιση της πληροφορίας που προέρχεται από διαφορετικές πηγές σε ένα πακέτο χωρίς περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Για παράδειγμα, έστω ένας WS που λαμβάνει δύο πακέτα που περιέχουν μετρήσεις διαφορετικών φυσικών μεγεθών, όπως θερμοκρασία και υγρασία. Αυτές οι δύο μετρήσεις δεν είναι δυνατό να υποστούν από κοινού επεξεργασία αλλά μπορούν να εκπεμφθούν στο ίδιο πακέτο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η μετάδοση μίας επικεφαλίδας πακέτου.

Ο πρώτος τρόπος έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση της μέσης ενέργειας που καταναλώνεται για εκπομπές. Ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ακρίβειας με την οποία η πληροφορία θα αναπαραχθεί στον κόμβο-συλλέκτη. Μετά την εφαρμογή συνάθροισης, δεν είναι δυνατό να αναπαραχθούν πλήρως τα αρχικά δεδομένα. Ο δεύτερος τρόπος διατηρεί τα αρχικά δεδομένα με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η πλήρης αναπαραγωγή στον κόμβο-συλλέκτη. Η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα υλοποιηθεί η συνάθροιση εξαρτάται από την εφαρμογή, το ρυθμό με τον οποίο παράγονται δεδομένα στους WS, τα χαρακτηριστικά του δικτύου και άλλα. Τόσο η συνάθροιση με μείωση του όγκου των δεδομένων όσο και η συνάθροιση χωρίς μείωση του όγκου των δεδομένων μπορεί να εμπλέκουν τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιπέδων των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

Οι τεχνικές συνάθροισης απαιτούν:

- i. Κατάλληλα πρωτόκολλα δρομολόγησης
- ii. Αποτελεσματικές συναρτήσεις συνάθροισης
- iii. Αποδοτικούς τρόπους για την περιγραφή των δεδομένων

Η συσχέτιση μεταξύ των τριών αυτών απαραίτητων συστατικών και των διαφορετικών επιπέδων των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων απεικονίζεται στο Σχ. 3.1.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα για τη σχέση μεταξύ των τεχνικών συνάθροισης και των επιπέδων των επικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

Πρωτόκολλα δρομολόγησης

Το σημαντικότερο συστατικό για τη συνάθροιση δεδομένων είναι ένα κατάλληλα σχεδιασμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Τα κλασικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προωθούν τα δεδομένα μέσω της συντομότερης διαδρομής που καταλήγει στον προορισμό. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου είναι επιθυμητή η συνάθροιση δεδομένων, οι WS πρέπει να προωθούν τα πακέτα με βάση το περιεχόμενό τους. Αυτός ο τρόπος προώθησης δεδομένων αποκαλείται δεδομενο-κεντρικός (data-centric routing). Κατά τη δεδομενο-κεντρική δρομολόγηση κάθε WS επιλέγει τον WS στον οποίο θα προωθήσει το πακέτο του με βάση τις θέσεις των υπολογιστικά ισχυρότερων κόμβων, τον τύπο των δεδομένων, την προτεραιότητα της πληροφορίας κ. λ. π..

Επιπλέον, οι τεχνικές για την υλοποίηση συνάθροισης μπορεί να απαιτούν συγχρονισμό μεταξύ των WS. Συγκεκριμένα, μπορεί να μην είναι η καλύτερη επιλογή για έναν κόμβο να προωθεί αμέσως τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του, αλλά να περιμένει να συγκεντρώσει πληροφορία και από άλλους γειτονικούς κόμβους. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί συνάθροιση ακόμα περισσότερων πακέτων με

αποτέλεσμα περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας. Στρατηγικές χρονισμού είναι απαραίτητες ειδικά σε εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης, όπου οι WS πρέπει να προωθούν περιοδικά τις μετρήσεις τους στον κόμβο-συλλέκτη. Οι στρατηγικές αυτές συνήθως κάνουν χρήση δένδρων που έχουν ως ρίζα τον κόμβο-συλλέκτη. Η προώθηση των πακέτων γίνεται κατά μήκος του δένδρου αυτού. Οι συνηθέστερες στρατηγικές χρονισμού είναι:

- Η περιοδική, απλή συνάθροιση (periodic simple aggregation) που απαιτεί κάθε WS να αναμένει επί μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Όταν παρέλθει αυτή η χρονική περίοδος, ο κόμβος προωθεί το πακέτο που προκύπτει από τη συνάθροιση των δεδομένων που έχει συγκεντρώσει μέχρι τη στιγμή αυτή.
- Η περιοδική συνάθροιση ανά βήμα (periodic per-hop aggregation) είναι παρόμοια με την προηγούμενη στρατηγική. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο ότι στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα της συνάθροισης προωθείται όταν ο WS έχει λάβει πακέτα από όλα τα παιδιά του. Η στρατηγική αυτή προϋποθέτει ότι κάθε κόμβος γνωρίζει το πλήθος των παιδιών του. Επίσης, ορίζεται ένα μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να αναμένει ένας κόμβος για να λάβει πακέτα από τα παιδιά του προκειμένου να αντιμετωπισθεί το ενδεχόμενο της απώλειας ορισμένων πακέτων.
- Η περιοδική, προσαρμοζόμενη συνάθροιση ανά βήμα (periodic per-hop adjusted aggregation) προσαρμόζει το μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να περιμένει ένας κόμβος για να λάβει πακέτα από τα παιδιά του με βάση τη θέση του κόμβου στο δένδρο κατά μήκος του οποίου γίνεται η συλλογή των δεδομένων.

Συναρτήσεις Συνάθροισης

Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες που πρέπει να παρέχεται μέσω της διαδικασίας της συνάθροισης είναι ο συνδυασμός των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικούς WS. Ο συνδυασμός δεδομένων γίνεται με χρήση συναρτήσεων συνάθροισης. Υπάρχουν διάφορα είδη τέτοιων συναρτήσεων, τα οποία μπορούν, ωστόσο, να ταξινομηθούν ως εξής:

- Συναρτήσεις συνάθροισης που εμφανίζουν απώλειες και συναρτήσεις συνάθροισης που δεν εμφανίζουν απώλειες: Κάποιες συναρτήσεις συνάθροισης μπορεί να συναθροίσουν και να συμπιέσουν τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο που να παρατηρηθούν απώλειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας συνάρτησης αποτελεί αυτή του μέσου όρου. Στην περίπτωση αυτή οι αρχικές μετρήσεις των WS δεν είναι δυνατό να αναπαραχθούν ακριβώς. Ο κάθε WS λαμβάνει μέσους όρους μετρήσεων από τους κόμβους-παιδιά του με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό ο κόμβος-συλλέκτης να ανακτήσει τη μέτρηση του κάθε WS. Αντίθετα, άλλες συναρτήσεις συνάθροισης επενεργούν με τέτοιο τρόπο στα δεδομένα ώστε οι αρχικές μετρήσεις να διατηρούνται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας συνάρτησης αποτελεί η μέγιστη τιμή. Στην περίπτωση αυτή, η μέτρηση του κάθε WS παραμένει αναλλοίωτη, απλώς ο κάθε WS προωθεί στον κόμβο-πατέρα του τη μέγιστη τιμή των μετρήσεων που έχει λάβει.
- Συναρτήσεις συνάθροισης που είναι ευαίσθητες σε αντίγραφα ενός πακέτου και συναρτήσεις συνάθροισης που δεν είναι ευαίσθητες σε αντίγραφα ενός πακέτου: Σε ορισμένα δίκτυα είναι ενδεχόμενο ένας ενδιάμεσος κόμβος να λάβει πολλά αντίγραφα της ίδιας πληροφορίας. Στην περίπτωση αυτή η ίδια πληροφορία θα ληφθεί πολλαπλές φορές υπόψη στο αποτέλεσμα της συνάθροισης. Όταν η συνάρτηση συνάθροισης είναι ευαίσθητη σε αντίγραφα ενός πακέτου, το τελικό αποτέλεσμα της συνάθροισης θα εξαρτάται από τον αριθμό των αντιγράφων της ίδιας μέτρησης που συμπεριλήφθηκαν στο τελικό αποτέλεσμα. Αντίθετα, μία συνάρτηση συνάθροισης μπορεί να μην εμφανίζει ευαισθησία σε αντίγραφα ενός πακέτου. Ένα παράδειγμα συνάρτησης συνάθροισης ευαίσθητης σε αντίγραφα είναι αυτή που υπολογίζει το μέσο όρο, ενώ ένα παράδειγμα συνάρτησης συνάθροισης που δεν είναι ευαίσθητη σε αντίγραφα είναι αυτή που επιστρέφει την ελάχιστη τιμή των μετρήσεων.

Οι συναρτήσεις συνάθροισης που χρησιμοποιούνται στα WSN πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα και τις περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας των WS. Είναι δηλαδή σημαντικό οι συναρτήσεις συνάθροισης να μπορούν να υλοποιηθούν με χρήση απλών τελεστών.

Περιγραφή Δεδομένων

Οι WS σε ένα WSN έχουν περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης πληροφοριών. Άρα, είναι ενδεχόμενο ένας κόμβος να μην είναι σε θέση να αποθηκεύσει στη μνήμη του όλες τις πληροφορίες που έχει λάβει ή έχει μετρήσει. Κρίνεται απαραίτητο, επομένως, για κάθε πληροφορία να αποφασίζεται ξεχωριστά ο τρόπος με τον οποίο αυτή θα τύχει διαχείρισης, δηλαδή εάν θα αποθηκευθεί, συμπιεσθεί, εκπεμφθεί ή αγνοηθεί. Σε κάθε περίπτωση, τη λήψη ορθής απόφασης εξυπηρετεί η κατάλληλη περιγραφή των δεδομένων, ο τρόπος περιγραφής των οποίων προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την εκάστοτε εξυπηρετούμενη εφαρμογή. Επιπλέον, καίτοι ο τρόπος περιγραφής των δεδομένων είναι συνήθως κοινός για όλους τους κόμβους του δικτύου, πρέπει να είναι προσαρμόσιμος στα χαρακτηριστικά κάθε κόμβου.

Για τη βέλτιστη επίδοση της διαδικασίας της συνάθροισης, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, οι συναρτήσεις συνάθροισης και η περιγραφή των δεδομένων πρέπει να σχεδιάζονται και υλοποιούνται από κοινού.

3.2 Επικοινωνιακά Πρωτόκολλα για την Υλοποίηση Συνάθροισης Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα σχετικά με τη συνάθροιση δεδομένων σε WSN, έχει επικεντρωθεί στο πώς μπορεί να γίνει η προώθηση των πακέτων στο δίκτυο προκειμένου να διευκολυνθεί η συνάθροιση της πληροφορίας. Η αρχική ιδέα ήταν να εξελιχθούν οι ήδη υπάρχοντες αλγόριθμοι δρομολόγησης προκειμένου να γίνει δυνατή ταυτόχρονα με τη δρομολόγηση και η συνάθροιση της πληροφορίας. Σε αυτήν τη φάση, οι περισσότερες μελέτες πρότειναν λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων ή ιεραρχικές δομές (tree-based approaches). Αυτές βασίζονται σε αλγόριθμους δρομολόγησης που χρησιμοποιούν δένδρα με ρίζα τον κόμβο-συλλέκτη. Συνήθως τα δένδρα αυτά είναι δένδρα συντομότερων διαδρομών (shortest path trees, SPTs). Ωστόσο, τελευταία, έχουν χρησιμοποιηθεί και περισσότερο σύνθετοι αλγόριθμοι για την κατασκευή των δένδρων αυτών. Εναλλακτικά, για την πραγματοποίηση της συνάθροισης έχουν χρησιμοποιηθεί αλγόριθμοι που ομαδοποιούν τοπικά τους WS σε συμπλέγματα (cluster-based approaches). Πρόσφατα, έχουν προταθεί λύσεις που αντιμετωπίζουν τα μειονεκτήματα των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων κάνοντας χρήση δρομολόγησης της ίδιας πληροφορίας μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath routing). Τέλος, έχουν προταθεί υβριδικές

λύσεις (hybrid approaches) που συνδυάζουν τις προηγούμενες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά λύσεις που ανήκουν στις τέσσερις αυτές κατηγορίες.

A. Λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων (tree-based approaches)

Οι κλασικές στρατηγικές δρομολόγησης βασίζονται στην ιεραρχική οργάνωση των κόμβων του δικτύου. Μάλιστα, ο απλούστερος τρόπος για τη συνάθροιση δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές και κατευθύνονται προς τον κόμβο-συλλέκτη είναι η επιλογή ειδικών κόμβων οι οποίοι λειτουργούν ως κόμβοι συνάθροισης και των οποίων οι θέσεις προσδιορίζουν την προτιμώμενη πορεία για τα πακέτα. Ένας κόμβος μπορεί να χαρακτηριστεί ως κόμβος συνάθροισης με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η θέση του στο δένδρο, τα ενεργειακά του αποθέματα και οι υπολογιστικές του δυνατότητες.

Στις λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων, κατασκευάζεται αρχικά ένα δένδρο με ρίζα τον κόμβο-συλλέκτη. Στη συνέχεια, το δένδρο αυτό χρησιμοποιείται για να απαντήσει το δίκτυο σε ερωτήματα που ξεκινούν από τον κόμβο-συλλέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση συνάθροισης κατά μήκος της δομής του δένδρου ανεβαίνοντας επίπεδα σταδιακά από τα φύλλα του δένδρου μέχρι και τη ρίζα του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όταν δύο ή περισσότερα πακέτα καταφθάνουν στον ίδιο κόμβο είναι δυνατό να συναθροισθούν και να συνεχίσουν την πορεία τους προς τη ρίζα του δένδρου ως ένα πακέτο.

Το βασικό μειονέκτημα των λύσεων που χρησιμοποιούν δομές δένδρων είναι ότι δεν αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά τις ενδεχόμενες αποτυχίες κάποιων κόμβων του δικτύου. Συγκεκριμένα, όταν ένα πακέτο χάνεται σε κάποιο επίπεδο του δένδρου, τα δεδομένα που περιέχονταν σε αυτό και που προέρχονταν από το αντίστοιχο υποδένδρο χάνονται επίσης. Μάλιστα είναι πιθανό το πακέτο που χάθηκε να περιείχε δεδομένα από όλους τους κόμβους του σχετιζόμενου υποδένδρου.

Παρά το ενδεχομένως υψηλό κόστος για τη διατήρηση μιας ιεραρχικής δομής σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο δίκτυο και την ευαισθησία σε αποτυχίες ζεύξεων ή κόμβων, οι λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων χρησιμοποιούνται συχνά. Οι λύσεις αυτές ενδείκνυνται για τη σχεδίαση

βέλτιστων συναρτήσεων συνάθροισης και για την αποδοτική διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων του δικτύου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι γνωστότεροι αλγόριθμοι δρομολόγησης που βασίζονται σε δένδρα συνάθροισης.

- **Tiny Aggregation Algorithm, TAG**

Ο αλγόριθμος Tiny Aggregation [11] είναι ένας δεδομενο-κεντρικός αλγόριθμος. Βασίζεται σε δένδρα συνάθροισης και είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης (monitoring applications). Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι παράγουν κατά περιοδικό τρόπο πληροφορία. Επομένως, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι δυνατό ο αλγόριθμος TAG να ενταχθεί στην κατηγορία της περιοδικής, προσαρμοζόμενης συνάθροισης ανά βήμα. Η υλοποίηση του πυρήνα του αλγορίθμου TAG χωρίζεται σε δύο κύριες φάσεις:

1. Τη φάση της κατανομής (distribution phase), κατά την οποία τα ερωτήματα του κόμβου-συλλέκτη διασπείρονται στους WS του δικτύου. Στη φάση αυτή ο κόμβος-συλλέκτης μεταδίδει (broadcast) ένα μήνυμα με το οποίο ζητά από τους κόμβους να οργανωθούν σε ένα δένδρο συνάθροισης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί το δένδρο αυτό για να προωθήσει τα ερωτήματά του. Σε κάθε μήνυμα υπάρχει ένα πεδίο που προσδιορίζει το επίπεδο, δηλαδή την απόσταση από τη ρίζα, του κόμβου που το απέστειλε. Στην περίπτωση όπου ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα και ο ίδιος δεν ανήκει ακόμα σε κάποιο επίπεδο του δένδρου, εντάσσεται στο αμέσως επόμενο επίπεδο από αυτό που αναφερόταν στο πεδίο προσδιορισμού του επιπέδου του μηνύματος που έλαβε. Δηλαδή, αν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα με πεδίο επιπέδου ίσο με k , εντάσσεται στο επίπεδο $k+1$ της δενδρικής δομής. Επιπλέον, ο κόμβος προσδιορίζει τον κόμβο από τον οποίο έλαβε το μήνυμα ως πατέρα του. Ο πατέρας ενός κόμβου χρησιμοποιείται για την προώθηση των πακέτων προς τη ρίζα. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος αναμεταδίδει το μήνυμα που έλαβε θέτοντας στα αντίστοιχα πεδία τη δική του ταυτότητα (ID) και το δικό του επίπεδο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ανατεθεί σε όλους τους κόμβους μία ταυτότητα (ID) και ένας πατέρας. Μηνύματα δρομολόγησης αποστέλλονται περιοδικά από τον κόμβο-συλλέκτη προκειμένου να διατηρείται η δομή του δένδρου. Μετά τη δημιουργία

του δένδρου, τα ερωτήματα του κόμβου-συλλέκτη αποστέλλονται κατά μήκος της δομής σε όλους τους WS του δικτύου.

2. Τη φάση της συλλογής (collection phase), κατά την οποία οι συναθροισμένες μετρήσεις των αισθητήρων δρομολογούνται κατά μήκος του δένδρου συνάθροισης προς τον κόμβο-συλλέκτη. Στη φάση αυτή, λόγω της δενδρικής δομής, κάθε πατέρας πρέπει να αναμένει για δεδομένα από όλα τα παιδιά του προκειμένου να προωθήσει το συναθροισμένο πακέτο προς τη ρίζα. Η περίοδος T κατά την οποία οι WS μετρούν το υπό παρατήρηση φαινόμενο χωρίζεται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα, τα διαστήματα επικοινωνίας (communication slots). Το πλήθος αυτών των διαστημάτων στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου είναι ίσο με το μέγιστο πλήθος των επιπέδων στο δένδρο δρομολόγησης. Η χρήση διαστημάτων επικοινωνίας παρέχει ένα βασικό πλεονέκτημα. Καθώς ο χρόνος είναι διαιρεμένος σε χρονικά διαστήματα, οι WS μπορούν να μεταβούν σε κατάσταση sleep (κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας) μέχρι το επόμενο διάστημα κατά το οποίο θα χρειασθεί να εκπέμψουν. Στην πράξη, οι WS μεταβαίνουν σε κατάσταση sleep σύντομα μετά την προώθηση του πακέτου στον κόμβο-πατέρα τους. Η διαδικασία της συνάθροισης πραγματοποιείται συνολικά από όλους τους ενδιάμεσους κόμβους.

Όπως και οι περισσότεροι αλγόριθμοι που βασίζονται σε δενδρικές δομές, ο αλγόριθμος TAG μπορεί να μη λειτουργεί αποδοτικά σε δυναμικά περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από μεταβολές στην τοπολογία και από αποτυχίες κόμβων ή ζεύξεων. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση αποτυχίας κάποιου ενδιάμεσου κόμβου, το σχετιζόμενο υποδένδρο μπορεί να αποσυνδεθεί από τον κόμβο-συλλέκτη. Ακόμα, αν μεταβληθεί η τοπολογία, πρέπει να δημιουργηθεί εκ νέου το δένδρο. Αυτό, ωστόσο, συνεπάγεται σημαντική κατανάλωση ενέργειας λόγω των απαιτούμενων ανταλλαγών μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων.

- **Directed Diffusion**

Το πρωτόκολλο Directed Diffusion [15] είναι δεδομένο-κεντρικό. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης είναι κατάλληλος για εφαρμογές με ένα (ή με μικρό αριθμό) κόμβο-συλλέκτη. Ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει τα

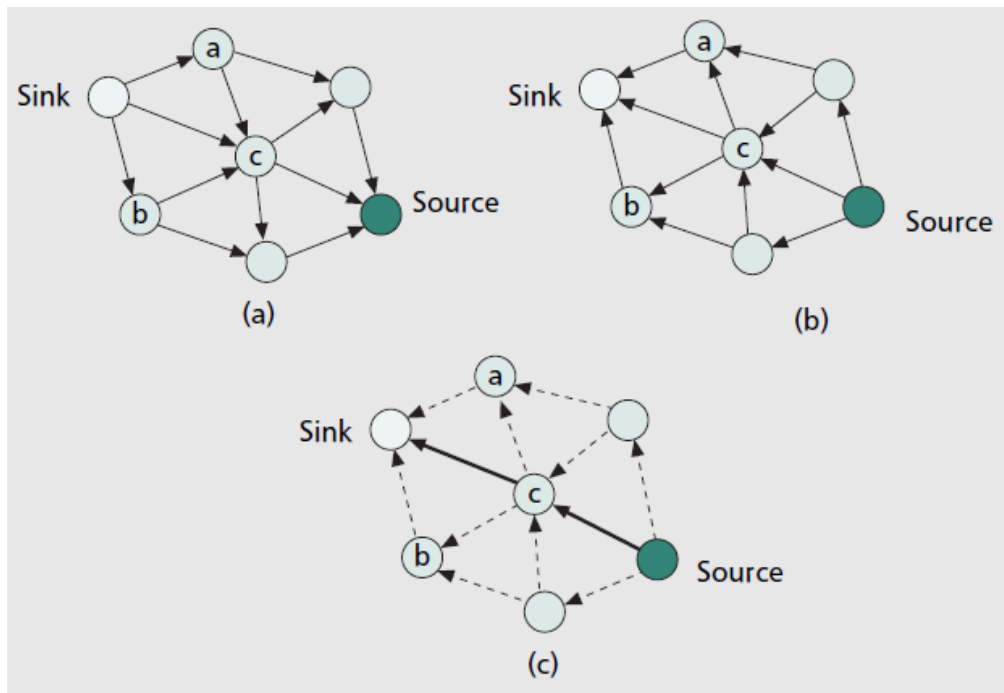
ερωτήματά του στους WS με τη διαδικασία της πλημμύρας. Η υλοποίηση του πυρήνα του αλγορίθμου Directed Diffusion χωρίζεται σε τρεις φάσεις:

1. Διάδοση του ενδιαφέροντος (interest dissemination)

Όταν ο κόμβος-συλλέκτης ενδιαφέρεται να συγκεντρώσει δεδομένα από τους WS του δικτύου, μεταδίδει ένα μήνυμα ενδιαφέροντος, όπου περιγράφεται ο τύπος των δεδομένων που ενδιαφέρουν και προσδιορίζεται η κατάσταση στην οποία πρέπει να μεταβούν οι κόμβοι για τη συλλογή τους. Κάθε κόμβος, όταν λαμβάνει το μήνυμα το αναμεταδίδει στους γείτονές του.

2. Δόμηση της ιεραρχικής δομής (gradient setup)

Κάθε φορά όπου ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα ενδιαφέροντος από άλλο κόμβο δημιουργεί ένα διάνυσμα. Το διάνυσμα αυτό προσδιορίζει ότι οι μετρήσεις που αντιστοιχούν σε αυτό το ενδιαφέρον μπορούν να προωθηθούν προς τον κόμβο από τον οποίο έλαβε το μήνυμα ενδιαφέροντος. Οι τιμές του διανύσματος προσαρμόζονται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως για παράδειγμα το επίπεδο της ενέργειας του κόμβου, η θέση του μέσα στο δίκτυο και οι δυνατότητες επικοινωνίας του. Προκειμένου να αποσαφηνισθούν τα ανωτέρω, παρατίθεται το παράδειγμα του Σχ.3.2.



Σχήμα 3.2 (a) Διάδοση του ενδιαφέροντος (b) Δημιουργία διανυσμάτων/προτιμητέων διαδρομών (c) Δρομολόγηση δεδομένων κατά μήκος της προτιμητέας διαδρομής

Στο Σχ.3.2 φαίνεται ότι ο κόμβος c λαμβάνει το ίδιο μήνυμα ενδιαφέροντος από τους κόμβους a και b. Επομένως, ο κόμβος c δημιουργεί δύο διανύσματα που προσδιορίζουν ότι τα δεδομένα του πρέπει να δρομολογηθούν προς τον κόμβο-συλλέκτη μέσω των κόμβων a και/ή b. Με βάση τις τιμές των διανυσμάτων που αντιστοιχούν στους κόμβους a και b, ο κόμβος c προωθεί διαφορετικό όγκο πληροφορίας προς έκαστο εξ αυτών.

Μετά τη διαδικασία του προσδιορισμού των διανυσμάτων από όλους τους κόμβους για ένα συγκεκριμένο ενδιαφέρον, μόνο μία διαδρομή είναι προτιμητέα για κάθε πηγή. Η προτιμητέα αυτή διαδρομή χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των δεδομένων προς τον κόμβο-συλλέκτη.

3. Προώθηση των δεδομένων κατά μήκος των προτιμητέων διαδρομών (path reinforcement and forwarding)

Το δένδρο συνάθροισης δημιουργείται από τις επιμέρους προτιμητέες διαδρομές. Το δένδρο συνάθροισης πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά, διαδικασία ιδιαίτερα δαπανηρή ενεργειακά για δυναμικά περιβάλλοντα.

Συνήθως, πραγματοποιείται συμβιβασμός (trade-off) μεταξύ της συχνότητας με την οποία ανανεώνονται τα διανύσματα των κόμβων και της απόδοσης του αλγορίθμου.

- **Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems, PEGASIS**

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου PEGASIS [16] είναι να οργανωθούν οι WS του δικτύου σε μία αλυσίδα. Μάλιστα, όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν διαδοχικά το ρόλο του αρχηγού της αλυσίδας. Ο κόμβος που λειτουργεί ως αρχηγός είναι ο μοναδικός που έχει το δικαίωμα να εκπέμψει δεδομένα απευθείας στον κόμβο-συλλέκτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να επιτευχθεί μία ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους του δικτύου. Η αλυσίδα είναι δυνατό να δημιουργηθεί είτε κεντρικά από τον κόμβο-συλλέκτη είτε κατανεμημένα από τους κόμβους του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, απαιτείται κάθε κόμβος να έχει γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι προκειμένου να λειτουργεί σωστά ο αλγόριθμος, πρέπει να είναι δυνατή η απευθείας επικοινωνία κάθε κόμβου του δικτύου με τον κόμβο-συλλέκτη. Η διαδικασία της συνάθροισης πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο. Δηλαδή, κάθε WS όταν λαμβάνει δεδομένα από ένα γείτονα, τα συναθροίζει με τη δική του μέτρηση, παράγει ένα πακέτο ίδιου μεγέθους και το προωθεί στον επόμενο κόμβο της αλυσίδας. Έτσι, το πακέτο που προκύπτει από τη διαδικασία της συνάθροισης προωθείται σταδιακά στην αλυσίδα μέχρι να φθάσει στον κόμβο-συλλέκτη. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι όταν οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων στην αλυσίδα είναι μεγάλες, η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική. Ακόμα, στην περίπτωση όπου κάποιοι κόμβοι είναι ιδιαίτερα απομακρυσμένοι από τον κόμβο-συλλέκτη, πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία τους ως αρχηγών της αλυσίδας. Διαφορετικά, οι κόμβοι αυτοί θα καταναλώνουν πολλή ενέργεια για να επικοινωνήσουν με τον κόμβο-συλλέκτη με αποτέλεσμα να εξαντλούνται ταχέως τα ενεργειακά τους αποθέματα και να τίθενται εκτός λειτουργίας. Επίσης, στην περίπτωση αποτυχίας σε κάποιο ενδιάμεσο κόμβο ή σε κάποια ενδιάμεση ζεύξη στην αλυσίδα, είναι αδύνατη η παράδοση των δεδομένων στον κόμβο-συλλέκτη όλων των προηγούμενων στην αλυσίδα κόμβων. Τα

χαρακτηριστικά του αλγορίθμου PEGASIS τον καθιστούν ακατάλληλο για δίκτυα με μεταβαλλόμενη τοπολογία.

- **Delay Bounded Medium Access Control, DB-MAC**

Μία διαφορετική προσέγγιση για τη δρομολόγηση των δεδομένων σε WSN με ταυτόχρονη υλοποίηση της συνάθροισης είναι αυτή του αλγορίθμου DB-MAC [17]. Ο αλγόριθμος αυτός αντιμετωπίζει από κοινού τη δρομολόγηση και τον έλεγχο προσπέλασης του ασύρματου μέσου μετάδοσης (Medium Access Control-MAC). Ο πρωταρχικός στόχος του αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου αντίδρασης του δικτύου (latency) χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τεχνικές συνάθροισης για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Για την πολλαπλή προσπέλαση υιοθετείται ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος σήματος και αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Το πρωτόκολλο αυτό είναι κατάλληλο για τις περιπτώσεις όπου διαφορετικές πηγές ανιχνεύουν ένα γεγονός πρακτικά ταυτόχρονα και λόγω χρονικών περιορισμών πρέπει να στείλουν τις μετρήσεις τους αμέσως στον κόμβο-συλλέκτη. Στις περιπτώσεις αυτές οι παραγόμενες ροές δεδομένων είναι δυνατό να συναθροίζονται δυναμικά ενώ δρομολογούνται προς τον κόμβο-συλλέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός δένδρου επί τόπου και κατά περίπτωση, χωρίς οι κόμβοι να έχουν γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Το πρωτόκολλο DB-MAC είναι ένα παράδειγμα υλοποίησης της διαδικασίας συνάθροισης με σχεδίαση σε δύο επίπεδα επικοινωνιακών πρωτοκόλλων, στο επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων και στο επίπεδο δικτύου.

B. Λύσεις που χρησιμοποιούν συμπλέγματα κόμβων-αισθητήρων (cluster-based approaches)

Παρόμοια με τις λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων, οι λύσεις που χρησιμοποιούν συμπλέγματα WS συμπεριλαμβάνουν την ιεραρχική οργάνωση του δικτύου. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή οι WS χωρίζονται σε ομάδες-συμπλέγματα. Επιπλέον, ορισμένοι κόμβοι, που ονομάζονται κεφαλές των συμπλεγμάτων (cluster heads), επιλέγονται για την υλοποίηση της διαδικασίας της συνάθροισης. Δηλαδή, στους επικεφαλής συμπλεγμάτων παράγονται τα συναθροισμένα πακέτα και από εκεί προωθούνται στον κόμβο-συλλέκτη. Τα πλεονεκτήματα και τα

μειονεκτήματα των λύσεων που χρησιμοποιούν συμπλέγματα WS είναι αντίστοιχα με αυτά των λύσεων που χρησιμοποιούν δομές δένδρων.

- **Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH**

Το LEACH [18] είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί συμπλέγματα WS. Εκτελείται σε δύο φάσεις:

1. Τη φάση οργάνωσης του δικτύου σε συμπλέγματα (setup phase).

Σε αυτήν τη φάση οι WS οργανώνονται σε συμπλέγματα και ένας κόμβος σε κάθε σύμπλεγμα επιλέγεται ως επικεφαλής. Η επιλογή των κόμβων που θα λειτουργήσουν ως επικεφαλής γίνεται με βάση τον εξής καταναμημένο, πιθανοτικό αλγόριθμο: Ο στόχος είναι να υπάρχουν κατά μέσον όρο $P\%$ κόμβοι που λειτουργούν ως επικεφαλής. Το $P\%$ προκύπτει με βελτιστοποίηση ανάλογα με την πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο. Αν R είναι μετρητής που δείχνει πόσες φορές έχει εκτελεσθεί ο αλγόριθμος και G το σύνολο που περιλαμβάνει τους κόμβους που δεν έχουν γίνει επικεφαλής τις τελευταίες $1/p$ φορές, οι κόμβοι του δικτύου υπολογίζουν τον αριθμό:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \left(R \bmod \left(\frac{1}{P} \right) \right)}, & \text{αν } n \in G \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.1)$$

Επιπλέον, κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία έναν αριθμό στο διάστημα $[0,1]$. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από το $T(n)$ που έχει υπολογίσει, αποφασίζεται ο κόμβος να γίνει επικεφαλής.

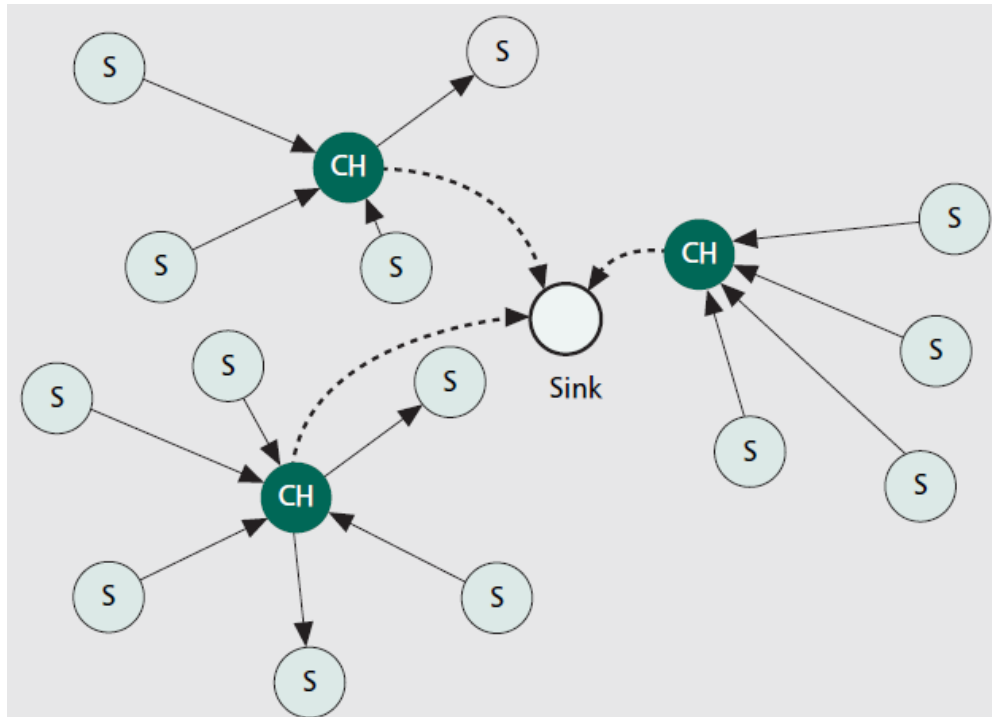
Στη συνέχεια, κάθε επικεφαλής στέλνει μηνύματα στους γειτονικούς του κόμβους με τα οποία τους ενημερώνει ότι είναι κόμβος-επικεφαλής. Οι WS επιλέγουν το σύμπλεγμα στο οποίο θα ενσωματωθούν με βάση την ισχύ αυτών των ενημερωτικών μηνυμάτων. Τέλος, με βάση το πλήθος των κόμβων που ενσωματώνονται σε ένα σύμπλεγμα ο αντίστοιχος επικεφαλής καταστρώνει ένα TDMA (Time Division Multiple Access) σχήμα για να διαχειρισθεί τοπικά τις εκπομπές.

2. Τη φάση σταθερής κατάστασης (steady-state phase).

Στη φάση αυτή όλοι οι WS αποστέλλουν τα δεδομένα τους στους επικεφαλής των συμπλεγμάτων όπου ανήκουν με βάση το

εγκατεστημένο TDMA σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Όταν οι επικεφαλής των συμπλεγμάτων έχουν λάβει τα δεδομένα από όλες τις ενεργές πηγές, τα προωθούν στον κόμβο-συλλέκτη. Η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων για το πρωτόκολλο LEACH φαίνεται στο Σχ.3.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν η απόσταση μεταξύ ενός κόμβου επικεφαλής και του κόμβου-συλλέκτη είναι μεγάλη, η κατανάλωση ενέργειας για την επικοινωνία τους μπορεί να είναι σημαντική. Για τον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας οι WS είναι δυνατό να τίθενται σε κατάσταση sleep μέχρι τη χρονοσχισμή όπου θα είναι η σειρά τους να εκπέμψουν. Από τη ρύθμιση αυτή εξαιρούνται φυσικά οι WS που λειτουργούν ως επικεφαλής αφού οι κεραιές τους πρέπει να είναι μονίμως ενεργοποιημένες για να λαμβάνουν δεδομένα.

Το πρωτόκολλο LEACH είναι πλήρως κατανεμημένο και έχει υψηλότερη απόδοση από τα περισσότερα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν συμπλέγματα WS. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα υλοποίησης οποιασδήποτε συνάρτησης συνάθροισης. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι η αδυναμία του να αντεπεξέλθει σε ιδιαίτερος δυναμικά περιβάλλοντα. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη ανταλλαγής μεγάλου πλήθους μηνυμάτων και, επομένως, στην υψηλή κατανάλωση ενέργειας για το σχηματισμό των συμπλεγμάτων.



Σχήμα 3.3 Με συνεχή γραμμή φαίνεται η συλλογή δεδομένων τοπικά από τους επικεφαλής και με διακεκομμένη η συλλογή των συναθροισμένων πακέτων από τον κόμβο-συλλέκτη.

- **Cougar**

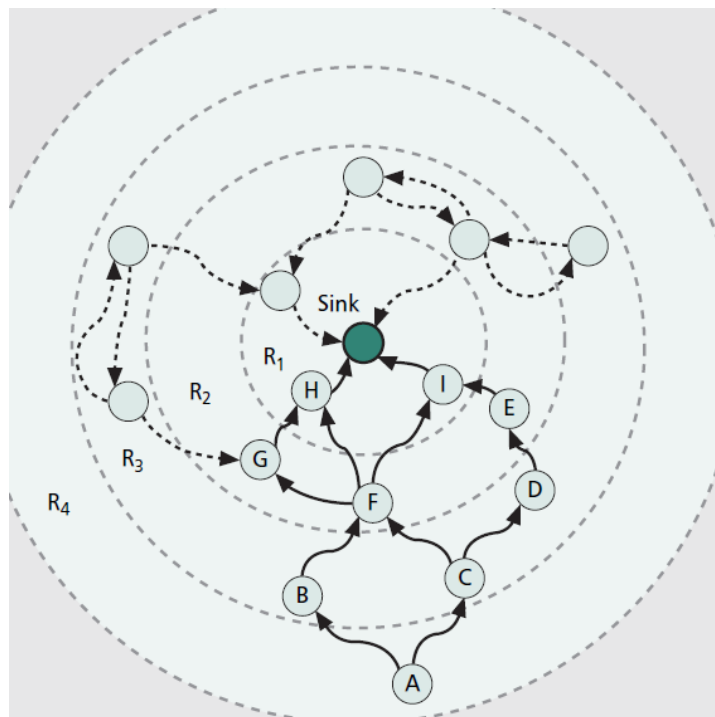
Το πρωτόκολλο Cougar [19,20] χρησιμοποιεί συμπλέγματα WS και είναι κατάλληλο για εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης όπου οι WS παράγουν δεδομένα κατά περιοδικό τρόπο. Μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία της περιοδικής συνάθροισης ανά βήμα. Όταν οι επικεφαλής κόμβοι λάβουν δεδομένα από όλους τους κόμβους του συμπλέγματος, αποστέλλουν το πακέτο που προκύπτει από τη συνάθροιση αυτών στον κόμβο που λειτουργεί ως πύλη (gateway node). Η βασική διαφορά μεταξύ των πρωτοκόλλων Cougar και LEACH έγκειται στη διαδικασία επιλογής των επικεφαλής των συμπλεγμάτων. Συγκεκριμένα, στο LEACH οι κόμβοι επιλέγουν τον επικεφαλής με τον οποίο θα συνδεθούν με βάση την ισχύ των διαφημιστικών μηνυμάτων που λαμβάνουν. Ενώ στο Cougar η επιλογή μπορεί να βασίζεται και σε άλλα κριτήρια (metrics). Αυτό έχει ως ενδεχόμενο ένας κόμβος να απέχει ένα ή περισσότερα βήματα (hops) από τον κόμβο επικεφαλής με τον οποίο είναι συνδεδεμένος. Για το λόγο αυτό ο αλγόριθμος δρομολόγησης που επιλέγεται για την ανταλλαγή μηνυμάτων

εντός των συμπλεγμάτων βασίζεται στην τεχνική Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV). Η τεχνική αυτή αποφεύγει την παραγωγή πολλαπλών αντιγράφων του ίδιου πακέτου και συνεπώς το πρωτόκολλο Cougar καθίσταται κατάλληλο για την υλοποίηση συνάθροισης με χρήση συναρτήσεων συνάθροισης που είναι ευαίσθητες σε αντίγραφα πακέτων. Ο πυρήνας του αλγορίθμου Cougar αποτελείται από τη μηχανή συγχρονισμού των κόμβων με την οποία εξασφαλίζεται η σωστή εκτέλεση της διαδικασίας της συνάθροισης. Κάθε κόμβος επικεφαλής διαθέτει κατάλογο με όλους τους κόμβους από τους οποίους αναμένει να λάβει δεδομένα. Ο κατάλογος αυτός ανανεώνεται κάθε φορά που ο επικεφαλής κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο από κάποιον κόμβο εντός του συμπλέγματός του. Ο επικεφαλής δεν αποστέλλει τα δεδομένα του στον κόμβο-συλλέκτη, μέχρι τη χρονική στιγμή t_{send} κατά την οποία έχει λάβει πακέτα από όλα τα πακέτα του καταλόγου του. Η χρονική στιγμή υπολογίζεται προσεγγιστικά με χρήση ενός μηχανισμού πρόβλεψης που εκτελείται στον επικεφαλής του συμπλέγματος. Μάλιστα, ένας κόμβος-παιδί του συμπλέγματος γνωρίζει εάν ο επικεφαλής κόμβος στον οποίο είναι προσδεμένος αναμένει πακέτο από αυτόν. Έτσι, είναι δυνατό να στείλει ένα πακέτο ειδοποίησης στον επικεφαλής προκειμένου να είναι περισσότερο ακριβής ο υπολογισμός του t_{send} . Τεχνικές οπισθοχώρησης (back-off mechanisms) και λήξης χρόνου (timeouts) χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπισθούν εσφαλμένες εκτιμήσεις.

C. Λύσεις που δρομολογούν την ίδια πληροφορία μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath routing)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τόσο οι λύσεις που χρησιμοποιούν δομές δένδρων όσο και οι λύσεις που χρησιμοποιούν συμπλέγματα κόμβων, ενέχουν τον κίνδυνο της απώλειας των δεδομένων αρκετών WS σε περίπτωση αποτυχίας κάποιου ενδιάμεσου κόμβου ή κάποιας ενδιάμεσης ζεύξης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται από τις λύσεις που δρομολογούν την ίδια πληροφορία μέσω πολλαπλών διαδρομών. Η βασική ιδέα αυτών των λύσεων είναι ότι ο κάθε κόμβος μπορεί να αποστείλει τα δεδομένα του σε πολλούς γείτονές του αξιοποιώντας τη δυνατότητα ευρυεκπομπής (broadcast) του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο παράγονται πολλαπλές ροές δεδομένων από τις πηγές προς τους

προορισμούς, εκάστη των οποίων ακολουθεί διαφορετική διαδρομή. Η διαδικασία της συνάθροισης πραγματοποιείται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο. Είναι φανερό ότι οι λύσεις αυτές επιτρέπουν τη δημιουργία και τη μετάδοση πολλαπλών αντιγράφων ενός πακέτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για εκπομπές σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες λύσεων. Υπάρχει δηλαδή ένας συμβιβασμός (trade-off) μεταξύ της ευρωστίας του δικτύου και της κατανάλωσης ενέργειας για εκπομπές. Μία δομή που χρησιμοποιείται συχνά για την υλοποίηση λύσεων που δρομολογούν την ίδια πληροφορία μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ.3.4 και καλείται τοπολογία δακτυλίων (ring topology). Στην τοπολογία, αυτή οι WS χωρίζονται σε επίπεδα με βάση το πλήθος των βημάτων (hops) που απέχουν από τον κόμβο-συλλέκτη. Δηλαδή, ένας κόμβος ανήκει στον κόμβο R_i αν απέχει i βήματα (hops) από τον κόμβο-συλλέκτη. Όπως φαίνεται στο Σχ.3.4 ο κάθε WS είναι πιθανό να προωθεί τα πακέτα του σε παραπάνω από έναν WS. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνάθροιση των δεδομένων να πραγματοποιείται πάνω από πολλές διαδρομές καθώς τα πακέτα μεταφέρονται από επίπεδο σε επίπεδο προς τον κόμβο-συλλέκτη.



Σχήμα 3.4 Παραδείγματα μονοπατιών συνάθροισης σε τοπολογία δακτυλίων.

- **Synopsis Diffusion**

Το Synopsis Diffusion πρωτόκολλο [21] δρομολογεί την ίδια πληροφορία μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath routing). Η τοπολογία που χρησιμοποιείται είναι συνήθως αυτή των ομόκεντρων κύκλων του Σχ.3.4. Η εκτέλεσή του πραγματοποιείται σε δύο φάσεις:

1. Τη φάση διανομής των ερωτημάτων.
2. Τη φάση ανάκτησης των δεδομένων.

Η διαδικασία της συνάθροισης εκτελείται τμηματικά ανά χρονικές περιόδους. Ένα συναθροισμένο πακέτο παράγεται στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου. Επιπλέον, σε κάθε χρονική περίοδο ανατίθενται χρονοσχιστές στους κόμβους προκειμένου να συντονιστούν οι εκπομπές τους με χρήση ενός σχήματος TDMA. Οι WS μπορούν να τεθούν σε κατάσταση sleep μέχρι τη χρονοσχιμή που τους έχει παραχωρηθεί για να εκπέμπουν. Η διαδικασία της συνάθροισης εκκινεί από τον πλέον απομακρυσμένο δακτύλιο (π.χ. τον R_i) και προχωράει στον επόμενο δακτύλιο (π.χ. τον R_{i-1}). Σταδιακά, δακτύλιο προς δακτύλιο, τα αποτελέσματα της συνάθροισης φθάνουν στον κόμβο-συλλέκτη. Για παράδειγμα, στο Σχ.3.4 φαίνεται πώς τα δεδομένα που παράγονται στον WS A είναι δυνατό να ληφθούν από τον κόμβο-συλλέκτη μέσω 7 διαφορετικών διαδρομών: {A,B,F,I,S}, {A,B,F,H,S}, {A,B,F,G,H,S}, {A,C,D,E,I,S}, {A,C,F,H,S}, {A,C,F,I,S} και {A,C,G,H,S}. Είναι φανερό ότι αφού τα δεδομένα μπορεί να ακολουθήσουν ταυτόχρονα διαφορετικές διαδρομές, υπάρχει η πιθανότητα κάποιος κόμβος να λάβει την ίδια πληροφορία περισσότερες από μία φορές. Αυτό μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της συνάθροισης όταν η συνάρτηση συνάθροισης είναι ευαίσθητη σε αντίγραφα. Το βασικό πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου Synopsis Diffusion είναι ότι αντιμετωπίζει επιτυχώς απώλειες πακέτων λόγω κινητικότητας των κόμβων ή αποτυχίας ζεύξεων. Αν υπάρξει αποτυχία σε κάποια διαδρομή τα δεδομένα είναι πιθανό να φθάσουν στον κόμβο-συλλέκτη από κάποια άλλη διαδρομή.

D. Υβριδικές λύσεις (hybrid approaches)

Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα τόσο των λύσεων που χρησιμοποιούν ιεραρχικές δομές όσο και των λύσεων που δρομολογούν την

ίδια πληροφορία προς πολλές διαφορετικές διαδρομές, είναι δυνατό να αναπτυχθούν υβριδικές λύσεις. Οι λύσεις αυτές προσαρμόζουν τη δομή που χρησιμοποιούν για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του δικτύου. Μία τέτοια υβριδική λύση είναι το πρωτόκολλο Tributaries and Deltas που παρουσιάζεται ακολούθως.

- **Tributaries and Deltas**

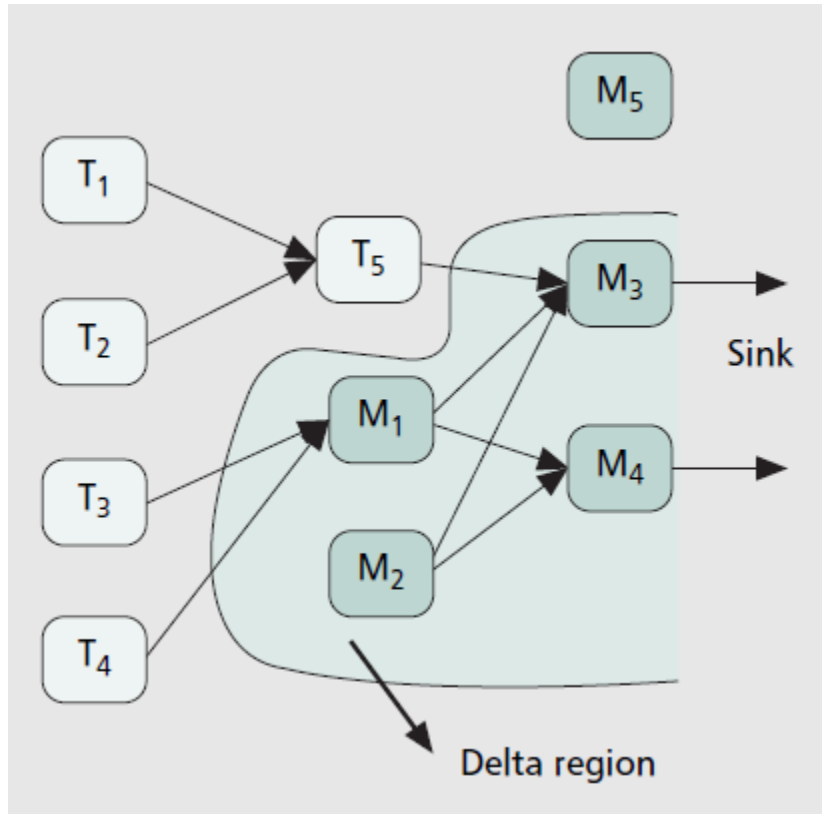
Το πρωτόκολλο Tributaries and Deltas [22] επιδιώκει να αντιμετωπίσει τα προβλήματα τόσο των λύσεων που χρησιμοποιούν ιεραρχικές δομές όσο και των λύσεων που δρομολογούν την ίδια πληροφορία προς πολλές διαφορετικές διαδρομές συνδυάζοντας τα καλύτερα χαρακτηριστικά και των δύο σχημάτων. Το αποτέλεσμα είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος όπου δομές συνάθροισης με τη μορφή δένδρων και με τη μορφή ομόκεντρων δακτυλίων συνυπάρχουν στο δίκτυο. Η βασική ιδέα είναι να προσαρμόζεται η τοπολογία προς το ποσοστό απωλειών πακέτων. Συγκεκριμένα, όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι χαμηλό, τα δένδρα συνάθροισης είναι η προτιμητέα τοπολογία λόγω της δυνατότητας διαμόρφωσης περιόδων κατά τις οποίες οι WS μεταβαίνουν σε κατάσταση “sleep” και λόγω της δυνατότητας υλοποίησης οποιασδήποτε συνάρτησης συνάθροισης. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι υψηλό, επιλέγεται η προσέγγιση μετάδοσης της ίδιας πληροφορίας μέσω πολλαπλών διαδρομών. Η προσέγγιση αυτή καθιστά το δίκτυο περισσότερο εύρωστο. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, οι WS στο δίκτυο διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στους κόμβους που χρησιμοποιούν δενδρική δομή για την προώθηση των πακέτων τους (WS T), και στους κόμβους που χρησιμοποιούν σχήμα προώθησης των πακέτων τους μέσω πολλαπλών διαδρομών (WS M). Η βασική δυσκολία υλοποίησης αυτού του σχήματος έγκειται στη διασύνδεση των περιοχών που χρησιμοποιούν διαφορετικές δομές για την υλοποίηση της συνάθροισης. Προκειμένου να γίνει επιτυχώς η διασύνδεση αυτή, πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής δύο κανόνες:

1. Ορθότητα ακμών (edge correctness): Μία ακμή που εκκινεί από WS M δεν μπορεί να προσπίπτει σε WS T. Αυτό συνεπάγεται ότι το αποτέλεσμα της συνάθροισης μιας περιοχής που χρησιμοποιεί σχήμα πολλαπλών διαδρομών μπορεί να ληφθεί μόνο από ένα WS M.

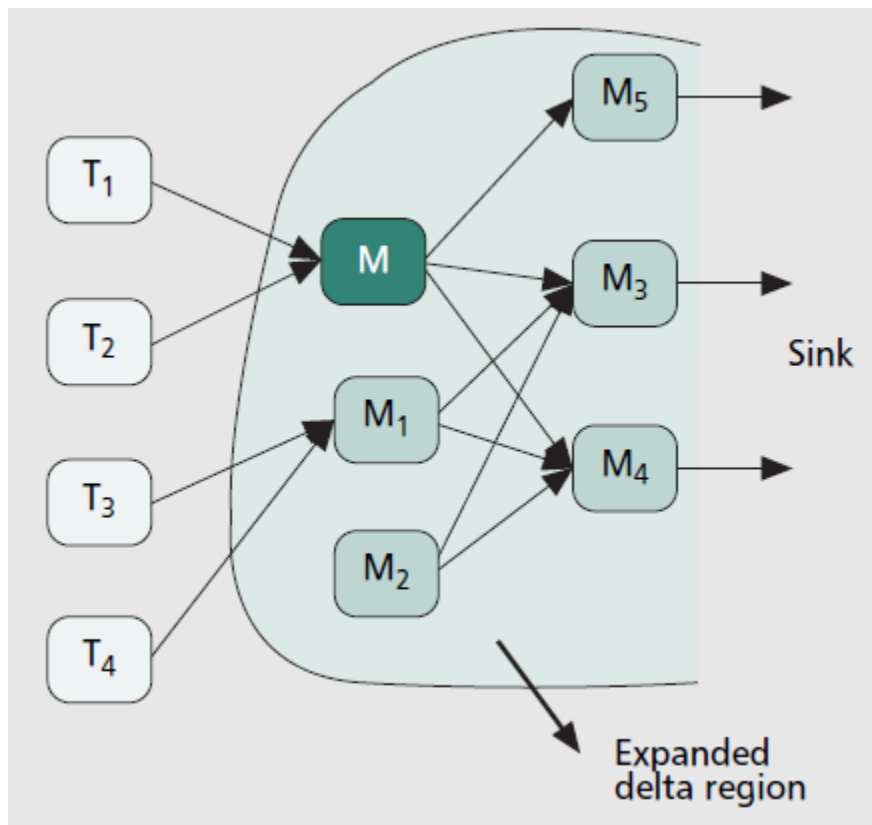
2. Ορθότητα διαδρομών (path correctness): Οι WS M μαζί με τον κόμβο-συλλέκτη σχηματίζουν έναν υπογράφο ο οποίος τροφοδοτείται από δένδρα WS T. Αυτό φαίνεται στα Σχ. 3.5, 3.6.

Όπως προκύπτει από τους δύο αυτούς κανόνες, ο κόμβος-συλλέκτης περικυκλώνεται μόνο από WS M. Η περιοχή που περιλαμβάνει τον κόμβο-συλλέκτη και τους κόμβους M ονομάζεται περιοχή δέλτα (delta region). Η περιοχή δέλτα είναι δυνατό να εξαπλωθεί ή να συρρικνωθεί μετατρέποντας κόμβους T σε κόμβους M και αντίστροφα, αντίστοιχα. Επί της ουσίας, οι μόνοι κόμβοι που είναι δυνατό να μετατραπούν είναι αυτοί που βρίσκονται στο όριο της περιοχής δέλτα. Μία περιοχή δέλτα φαίνεται στο Σχ. 3.5 και μία επέκταση αυτής φαίνεται στο Σχ.3.6. Επέκταση της περιοχής δέλτα συνεπάγεται αύξηση του πλήθους των μονοπατιών προς τον κόμβο-συλλέκτη. Αυτό είναι επιθυμητό όταν το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι υψηλό. Αντίθετα, όταν το δίκτυο είναι στατικό και το ποσοστό απωλειών πακέτων είναι χαμηλό, μπορεί να είναι συμφέρουσα η συρρίκνωση της περιοχής δέλτα.

Ο αλγόριθμος Tributaries and Deltas εξασφαλίζει χαμηλότερο ποσοστό λαθών από τους αλγορίθμους που βασίζονται σε δενδρικές δομές και ταυτόχρονα αντιμετωπίζει τα προβλήματα των λύσεων που βασίζονται σε πολλαπλές διαδρομές. Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι η ανάγκη ανταλλαγής σημαντικού πλήθους μηνυμάτων για την ανανέωση της τοπολογίας του δικτύου.



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα συλλογής δεδομένων σε περιοχή δέλτα.



Σχήμα 3.6 Παράδειγμα συλλογής δεδομένων σε εκτεταμένη περιοχή δέλτα.

3.3 Τρόποι Περιγραφής Δεδομένων και Συναρτήσεις για την Πραγματοποίηση Συνάθροισης Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ζητήματα του τρόπου περιγραφής των δεδομένων και της επιλογής της βέλτιστης συνάρτησης συνάθροισης συνδέονται στενά. Οι περισσότερες λύσεις που έχουν προταθεί ως τώρα υλοποιούν απλές συναρτήσεις συνάθροισης όπως εξαγωγή μέσου όρου, ενδιάμεσης τιμής, ελάχιστης τιμής και μέγιστης τιμής των μετρήσεων. Η εφαρμογή αυτών των συναρτήσεων συνάθροισης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλήθους των πακέτων που μεταδίδονται στο δίκτυο και, επομένως, τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για εκπομπές. Ωστόσο, αυτές οι συναρτήσεις συνάθροισης ανήκουν ταυτόχρονα στην κατηγορία των συναρτήσεων συνάθροισης που εμφανίζουν απώλειες και επομένως, μπορεί να επηρεάσουν καθοριστικά την ακρίβεια της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου ενδιαφέρει η ακριβής περιγραφή των δεδομένων, καθίσταται αναγκαία η χρήση περισσότερο πολύπλοκων συναρτήσεων συνάθροισης και τρόπων περιγραφής των δεδομένων. Στο υπόλοιπο αυτής της ενότητας παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα παραδείγματα υλοποίησης σύνθετων συναρτήσεων συνάθροισης. Αρχικά, παρουσιάζονται απλές προσεγγίσεις και στη συνέχεια σύνθετες. Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος της κατανεμημένης κωδικοποίησης πηγής, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται από κοινού κωδικοποίηση συσχετισμένων δεδομένων από πολλές πηγές με κατανεμημένο τρόπο.

- **Συνάθροιση με Αξιοποίηση των Χρονικών Συσχετίσεων, Temporal Coherency-Aware in-Network Aggregation (TiNA)**

Ο αλγόριθμος TiNA [23] εκτελείται επί ενός δένδρου συνάθροισης με ρίζα το σημείο συγκέντρωσης των πληροφοριών, δηλαδή τον κόμβο-συλλέκτη. Αξιοποιεί τη χρονική συσχέτιση μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ενός WS προκειμένου να μη μεταδοθούν οι μετρήσεις εκείνες που δεν θα επηρεάσουν το αποτέλεσμα της διαδικασίας της συνάθροισης. Συγκεκριμένα, σε ένα WS που είναι φύλλο του δένδρου, κάθε καινούργια μέτρηση V_{new} συγκρίνεται με την τελευταία μέτρηση V_{old} . Η καινούργια τιμή μεταδίδεται και συμπεριλαμβάνεται στη διαδικασία της συνάθροισης εφόσον ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{|V_{new} - V_{old}|}{V_{new}} > tct \quad (3.2)$$

όπου tct είναι μία παράμετρος που υποδηλώνει πόσο χρονικά συσχετισμένες μετρήσεις απαιτούνται από το ερώτημα του κόμβου-συλλέκτη.

Η διαδικασία της συνάθροισης στους ενδιάμεσους κόμβους είναι η ακόλουθη. Αρχικά, κάθε κόμβος συλλέγει και συνδυάζει τα πακέτα που λαμβάνει από τα παιδιά του. Αν ένας κόμβος δεν λάβει έγκυρα δεδομένα από κάποιο παιδί του, χρησιμοποιεί την τελευταία έγκυρη μέτρηση που έλαβε από αυτό. Με τον όρο έγκυρα δεδομένα εννοείται ότι το ποσοστό των λανθασμένων bit είναι αρκετά χαμηλό ώστε να μπορεί να αναγνωστεί σωστά η πληροφορία από τον κόμβο-πατέρα. Στη συνέχεια, ο κόμβος εξετάζει τη δική του μέτρηση. Εφόσον η μέτρησή του απαντά στο ίδιο ερώτημα με τις μετρήσεις που έχει συναθροίσει, τη συμπεριλαμβάνει στο συναθροισμένο πακέτο. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι συμπεριλαμβάνουν τις μετρήσεις τους με μοναδικό κριτήριο το περιεχόμενό τους. Δηλαδή δεν εξετάζεται η χρονική συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων που μεταδίδουν. Επομένως, υπάρχει το ενδεχόμενο οι ενδιάμεσοι κόμβοι να μεταδίδουν τις μετρήσεις τους συχνότερα από τους κόμβους-φύλλα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακρίβεια του αποτελέσματος της συνάθροισης.

Προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι οι κόμβοι-φύλλα δεν έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας αλλά απλώς δεν είχαν αρκετά διαφορετικές μετρήσεις, είναι υποχρεωτικό οι κόμβοι-φύλλα να αποστέλλουν περιοδικά ειδοποιητικά μηνύματα στον πατέρα τους.

- **Συνάθροιση ή Αραίωση Δεδομένων με Χρήση Συνάρτησης Υπολοίπου, Data Aggregation and Dilution by Modulus Addressing (DADMA)**

Ο αλγόριθμος DADMA [24] αντιμετωπίζει το WSN ως κατανεμημένη βάση δεδομένων. Η βασική ιδέα είναι η συνάθροιση δεδομένων που προέρχονται από συγκεκριμένη ομάδα κόμβων ή να αποκλείσει ορισμένους κόμβους από το δένδρο συνάθροισης. Αυτές οι διαδικασίες διεκπεραιώνονται με χρήση των εξής δύο κανόνων:

1. Ένας χρήστης μπορεί να ανακτήσει δεδομένα από ένα υποσύνολο των κόμβων του δικτύου με χρήση της συνάρτησης συνάθροισης m (aggregate m function):

$$f_{\alpha}(x) = x \text{ div } m \quad (3.3)$$

2. Ένας χρήστης μπορεί να αποκλείσει ορισμένους κόμβους από μία ερώτησή του με χρήση της συνάρτησης αραίωσης m (dilute m function):

$$f_d(x) = \frac{x}{r} \bmod \frac{m}{r} \quad (3.4)$$

Στις εξισώσεις (3.3) και (3.4) x είναι συντεταγμένη της θέσης του κόμβου, r η ανάλυση σε μέτρα και m είναι ο παράγοντας συνάθροισης ή αραίωσης, αντίστοιχα. Όταν ο κόμβος-συλλέκτης αποστέλλει ένα ερώτημα προσδιορίζει αν επιθυμεί να πραγματοποιηθεί συνάθροιση ή αραίωση. Επιπλέον, σε ένα πεδίο του ερωτήματος του μηνύματος ορίζει μία τιμή με βάση την οποία οι κόμβοι θα αποφασίσουν αν θα λάβουν μέρος στην απάντηση του δικτύου. Για παράδειγμα, έστω ότι ένας κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα αραίωσης m . Αρχικά υπολογίζει τη συνάρτηση αραίωσης που του αντιστοιχεί με βάση τις συντεταγμένες του (x,y) . Δηλαδή υπολογίζει τα $f_d(x), f_d(y)$. Στη συνέχεια, συγκρίνει τις τιμές αυτές με τις τιμές που περιέχονται στο πεδίο βάσης. Αν οι τιμές αυτές βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους, ο κόμβος απαντά στο ερώτημα του κόμβου-συλλέκτη. Στην αντίθετη περίπτωση δεν απαντά. Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται στην περίπτωση όπου ένας κόμβος λάβει μήνυμα συνάθροισης.

Επί της ουσίας, ο αλγόριθμος DADMA λαμβάνει υπόψη τη χωρική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων των κόμβων, πραγματοποιώντας συνήθως συνάθροιση μόνο στις μετρήσεις κόμβων που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους.

- **Συνάθροιση Δεδομένων με Χρήση Ελέγχου Ανάδρασης**

Η τεχνική της Συνάθροισης Δεδομένων με Χρήση Ελέγχου Ανάδρασης [25] προτείνει ένα τρόπο ρύθμισης του βαθμού της συνάθροισης ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένους περιορισμούς ως προς το χρόνο απόκρισης του δικτύου και την ενεργειακή κατανάλωση. Δηλαδή, ο στόχος του αλγορίθμου είναι η εξασφάλιση της παράδοσης των δεδομένων στον κόμβο-συλλέκτη με το ελάχιστο δυνατό ενεργειακό κόστος και ικανοποιώντας όλους τους πιθανούς χρονικούς περιορισμούς. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την προσαρμογή του βαθμού της συνάθροισης προκειμένου να ικανοποιηθούν τα εκάστοτε χρονικά και ενεργειακά κριτήρια. Συγκεκριμένα, ο βαθμός συνάθροισης (d) ορίζεται ως ο λόγος των μηνυμάτων που εξέρχονται προς το λόγο των μηνυμάτων που εισέρχονται σε ένα κόμβο. Όταν ο συνολικός όγκος της πληροφορίας στο δίκτυο υπερβαίνει τη χωρητικότητα αυτού, ο όγκος των δεδομένων πρέπει να μειωθεί. Δηλαδή, ο βαθμός συνάθροισης πρέπει να μειωθεί. Αντίθετα, όταν ο όγκος της πληροφορίας στο δίκτυο είναι μικρός, ο βαθμός συνάθροισης μπορεί να αυξηθεί. Η προσαρμογή του βαθμού συνάθροισης πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός μηχανισμού ανάδρασης με

απώλειες (lossy feedback loop mechanism) που εκτελείται σε κάθε κόμβο. Ο μηχανισμός αυτός αναθέτει ένα βαθμό συνάθροισης με βάση εκτιμήσεις του όγκου δεδομένων και της χωρητικότητας του δικτύου. Ο βαθμός συνάθροισης d προσαρμόζεται με βάση τις εκάστοτε νεότερες εκτιμήσεις. Επιπλέον, όταν το δίκτυο δεν βρίσκεται σε κατάσταση υπερφόρτισης, στους κόμβους υλοποιείται ένας μηχανισμός ανάδρασης χωρίς απώλειες (loss-less feedback loop). Ο μηχανισμός αυτός μειώνει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να συμπιέζει τις μετρήσεις των κόμβων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνάθροιση των μετρήσεων σε ένα πακέτο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η κατανάλωση ενέργειας για εκπομπή περισσότερων επικεφαλίδων.

- **Κατανεμημένη Κωδικοποίηση Πηγής, Distributed Source Coding (DSC)**
Ένας τρόπος που προτάθηκε πρόσφατα για την υλοποίηση συνάθροισης αξιοποιεί την κατανεμημένη κωδικοποίηση πηγής [26]. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή βασίζεται στο θεώρημα Slepian-Wolf, το οποίο επιτρέπει την από κοινού κωδικοποίηση συσχετισμένων δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν απαιτείται επικοινωνία μεταξύ των πηγών. Αυτή η από κοινού κωδικοποίηση είναι δυνατή εφόσον οι ρυθμοί μετάδοσης των πηγών ικανοποιούν ορισμένες προϋποθέσεις ως προς τις υπό συνθήκη εντροπίες τους. Ένας απλός τρόπος για την κωδικοποίηση και μετάδοση δεδομένων που παράγονται από δύο πηγές X και Y είναι να εφαρμοστεί ανεξάρτητα κωδικοποίηση σε καθεμία με συνολικό ρυθμό κωδικοποίησης $R_1 + R_2 = H(X) + H(Y)$ όπου $H(\cdot)$ είναι η εντροπία της ροής δεδομένων. Αν οι δύο πηγές μπορούν να επικοινωνήσουν, είναι δυνατό να συντονίσουν τις κωδικοποιήσεις τους με αποτέλεσμα να χρειαστεί για αυτές συνολικά ρυθμός κωδικοποίησης ίσος με $H(X, Y) \leq R_1 + R_2$. Έχει αποδειχθεί ότι δύο συσχετισμένες πηγές είναι δυνατό να κωδικοποιηθούν με συνολικό ρυθμό ίσο με την από κοινού εντροπία $H(X, Y)$ ακόμα και όταν δεν είναι δυνατό να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Η μόνη προϋπόθεση είναι η εντροπία κάθε πηγής να είναι τουλάχιστον ίση με τις υπό συνθήκη εντροπίες. Καίτοι οι διαφορετικές πηγές δεν χρειάζεται να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, είναι απαραίτητο να έχουν πληροφορίες για τη συσχέτισή τους. Για το σκοπό αυτό, ο κόμβος-συλλέκτης μπορεί να συγκεντρώσει μια μικρή ποσότητα πληροφοριών από το δίκτυο, να την επεξεργαστεί και στη συνέχεια να στείλει τις απαραίτητες πληροφορίες περί συσχετίσεων στους αισθητήρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

Η Θεωρία Παιγνίων (Game Theory) αφορά τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οντοτήτων (παικτών) που λαμβάνουν αποφάσεις και μπορεί να έχουν κοινά ή αντικρουόμενα συμφέροντα. Ο όρος αλληλεπιδράσεις υποδηλώνει ότι κάθε παίκτης επηρεάζεται από τις ενέργειες των υπολοίπων. Επομένως, το αποτέλεσμα των ενεργειών κάθε παίκτη δεν καθορίζεται μόνο από τις δικές του αποφάσεις αλλά και από αυτές των υπολοίπων παικτών.

Ο σκοπός της Θεωρίας Παιγνίων είναι η μαθηματική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ παικτών-πρακτόρων και ο προσδιορισμός των πιθανών εκβάσεων για την κατάσταση του παιγνίου που παρακολουθείται. Με βάση συγκεκριμένες υποθέσεις ως προς τις γνώσεις και τη συμπεριφορά των παικτών είναι δυνατό να προβλεφθεί η λύση (ή οι λύσεις) ενός παιγνίου αλλά και να σχεδιαστούν μηχανισμοί που θα επιφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

4.1 Μαθηματική Περιγραφή και Κατηγοριοποίηση Παιγνίων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο μαθηματικός ορισμός των παιγνίων. Ο ορισμός καθορίζεται από τη μαθηματική περιγραφή του παιγνίου που επιλέγεται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τρεις συνηθέστερες μαθηματικές περιγραφές παιγνίων. Ακόμα, γίνεται μία σύντομη αναφορά στις πιο γνωστότερες κατηγορίες παιγνίων.

4.1.1 Μαθηματικές Περιγραφές Παιγνίων

Οι τρεις συνηθέστερες μαθηματικές περιγραφές παιγνίων είναι οι εξής:

- Η κανονική ή στρατηγική μορφή (normal or strategic form)
- Η εκτεταμένη μορφή (extensive form)
- Η συνελκτική μορφή (coalitional form)

Στην εργασία αυτή θα εξεταστούν μόνο μη-συνεργατικά παίγνια. Αυτό σημαίνει ότι θα είναι δυνατή η εύρεση συνάρτησης οφέλους (utility function) του κάθε παίκτη ατομικά. Δεν θα γίνει αναφορά σε παίγνια συνελκτικής μορφής

4.1.1.1 Παίγνιο Κανονικής ή Στρατηγικής Μορφής

Παίγνιο Κανονικής ή Στρατηγικής Μορφής

Ένα παίγνιο κανονικής ή στρατηγικής μορφής είναι μία τριάδα:

$$\mathcal{G} = (\mathcal{K}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \succsim_i) \quad (4.1)$$

όπου $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ είναι το σύνολο των παικτών, \mathcal{S}_i είναι το σύνολο των στρατηγικών του παίκτη i και \succsim_i είναι η διάταξη προτίμησης που περιλαμβάνει το σύνολο με τις στρατηγικές του παίκτη i .

Η στρατηγική μορφή είναι η συχνότερα χρησιμοποιούμενη μορφή παιγνίου. Είναι εύκολα διαχειρίσιμη μαθηματικά και μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις τόσο διακριτών όσο και συνεχών συνόλων στρατηγικών. Όταν είναι δυνατό, αντικαθίσταται η διάταξη προτίμησης από μία πραγματική συνάρτηση. Ο στόχος στην περίπτωση αυτή είναι η ανάθεση μιας αριθμητικής τιμής σε κάθε πιθανή έκβαση του παιγνίου. Συχνά στις ασύρματες επικοινωνίες τα μέτρα της επίδοσης (π.χ. η ποιότητα υπηρεσίας) χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις οφέλους (utility functions) των παικτών.

Υπαρξη Συνάρτησης Οφέλους (για αριθμήσιμα σύνολα στρατηγικών των παικτών)

Υπάρχει συνάρτηση οφέλους για κάθε διάταξη σε ένα αριθμήσιμο σύνολο που ικανοποιεί τις ιδιότητες:

- Της πληρότητας: $x \succsim y$ ή $y \succsim x$
- Της μεταβατικότητας « $x \succsim y$ και $y \succsim z$ » $\Rightarrow x \succsim z$

Εφόσον υπάρχει η συνάρτηση οφέλους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος ορισμός:

Παίγνιο Κανονικής ή Στρατηγικής Μορφής

Ένα παίγνιο κανονικής ή στρατηγικής μορφής είναι μία διατεταγμένη τριάδα:

$$\mathcal{G} = (\mathcal{K}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \{\mathbf{u}_i\}_{i \in \mathcal{K}}) \quad (4.2)$$

όπου $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ είναι το σύνολο των παικτών, \mathcal{S}_i το σύνολο των στρατηγικών του παίκτη i και \mathbf{u}_i είναι το σύνολο των οφελών του παίκτη i .

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται σε κανονική μορφή το γνωστό παίγνιο «Δίλημμα των Φυλακισμένων» (Prisoner's Dilemma -PD). Η υπόθεση έχει ως εξής: «Δύο ύποπτοι για ένα έγκλημα συλλαμβάνονται από την αστυνομία. Η αστυνομία δεν έχει επαρκή

στοιχεία προκειμένου να αποφασίσει ποιος είναι ο ένοχος, οπότε πρέπει να εξασφαλίσει ότι οι ύποπτοι θα ομολογήσουν. Αφού λοιπόν βάλει καθένα από τους υπόπτους σε διαφορετικό χώρο τους προτείνει μία συμφωνία. Αν ο ένας από τους δύο ομολογήσει και ο άλλος όχι, ο πρώτος αφήνεται ελεύθερος και ο δεύτερος καταδικάζεται σε δέκα χρόνια φυλακή. Αν και οι δύο δεν ομολογήσουν, καταδικάζεται καθένας μόνο σε έξι μήνες φυλακή. Αν ομολογήσουν και οι δύο, ο καθένας καταδικάζεται σε πέντε χρόνια φυλακή». Κάθε κρατούμενος πρέπει να αποφασίσει αν θα ομολογήσει ή όχι. Η διατύπωση του προβλήματος αυτού υπό μορφή παιγνίου στρατηγικής μορφής που παίζεται μόνο μία φορά είναι η εξής:

- Οι παίκτες είναι οι δύο κρατούμενοι, που αποκαλούνται παίκτης 1 και παίκτης 2. Επομένως, το σύνολο των παικτών είναι $\mathcal{K}^{PD} = \{1,2\}$.
- Το σύνολο των δυνατών στρατηγικών κάθε παίκτη είναι $\mathcal{A}_i^{PD} = \{\text{Ομολογία}, \text{Όχι ομολογία}\}$.
- Υπάρχουν άπειρες πιθανές συναρτήσεις οφέλους για τη μαθηματική διατύπωση αυτής της διαδικασίας αλληλεπίδρασης. Για παράδειγμα, μπορεί να υποτεθεί ότι όταν ένας κρατούμενος αφήνεται ελεύθερος έχει όφελος 4, όταν μένει στη φυλακή για έξι μήνες έχει όφελος 3, όταν μένει στη φυλακή για πέντε χρόνια έχει όφελος 1 και όταν μένει στη φυλακή για δέκα χρόνια έχει όφελος 0. Με αυτήν την επιλογή, η συνάρτηση οφέλους κάθε παίκτη $i \in \{1,2\}$, είναι η ακόλουθη:

$$u_i^{PD}: \begin{cases} \mathcal{A}_1^{PD} \times \mathcal{A}_2^{PD} \rightarrow \{0,1,3,4\} \\ (\alpha_1, \alpha_2) \mapsto u_i^{PD}(\alpha_1, \alpha_2) \end{cases}$$

Η τριάδα $(\mathcal{K}^{PD}, \{\mathcal{S}_i^{PD}\}_{i \in \mathcal{K}}, \{u_i^{PD}\}_{i \in \mathcal{K}})$ αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του παιγνίου υπό στρατηγική μορφή. Μία συνήθης παρουσίαση της στρατηγικής μορφής των παιγνίων είναι με τη μορφή πίνακα. Για το παίγνιο του Διλήμματος των Φυλακισμένων η παρουσίαση αυτή φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Παρατηρείται στον πίνακα αυτό ότι όταν ο Παίκτης 1 παίζει «Μη ομολογία», τον Παίκτη 2 τον συμφέρει να παίζει «Ομολογία». Όταν ο Παίκτης 1 παίζει «Μη ομολογία», τον Παίκτη 2 τον συμφέρει και πάλι να παίζει «Ομολογία». Επομένως ο Παίκτης 2 επιλέγει πάντα να παίζει «Ομολογία». Αντίστοιχα, συνάγεται ότι τον Παίκτη 1 τον συμφέρει πάντα να παίζει «Ομολογία». Φαίνεται λοιπόν πως η αστυνομία πέτυχε το στόχο της.

Παίκτης 1 \ Παίκτης 2	Μη Ομολογία	Ομολογία
Μη ομολογία	(3,3)	(0,4)
Ομολογία	(4,0)	(1,1)

Πίνακας 4.1 Το παίγνιο PDA

4.1.1.2 Παίγνιο Εκτεταμένης Μορφής

Η μαθηματική περιγραφή των παιγνίων σε εκτεταμένη μορφή είναι χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου οι παίκτες δεν ενεργούν ταυτόχρονα αλλά σειριακά, ο ένας μετά τον άλλο. Η μαθηματική περιγραφή αυτή χρησιμοποιεί τη δομή δένδρου.

Δένδρο

Ένα δένδρο είναι μία τριάδα $(\mathcal{V}, v_{root}, \pi)$ όπου:

- \mathcal{V} είναι το σύνολο των κόμβων
- v_{root} είναι η ρίζα του δένδρου
- π είναι η συνάρτηση που υποδεικνύει τους προγόνους των κόμβων. Ισχύει ότι $\forall v \in \mathcal{V}, \exists n \geq 1, \pi^{(n)} = \pi \circ \dots \circ \pi = v_{root}$

Συνήθη Παίγνια Εκτεταμένης Μορφής

Ένα παίγνιο εκτεταμένης μορφής είναι μία εξάδα της μορφής:

$$\mathcal{G} = (\mathcal{K}, \mathcal{V}, v_{root}, \pi, \{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \underline{u}) \quad (4.3)$$

όπου $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ είναι το σύνολο των παικτών, $(\mathcal{V}, v_{root}, \pi)$ ένα δένδρο, $\{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}$ μία διαίρεση του \mathcal{V} και \underline{u} είναι μία συνάρτηση αποτελεσμάτων. Για μη συνεργατικά παίγνια $\underline{u} = (u_1, \dots, u_K)$.

Επομένως, στα παίγνια εκτεταμένης μορφής, το παίγνιο περιγράφεται υπό τη μορφή δένδρου. Σε κάθε κόμβο του δένδρου, ο εκάστοτε παίκτης λαμβάνει μία απόφαση. Επομένως, ο επόμενος κόμβος εξαρτάται από την απόφαση που λήφθηκε.

Στα συνήθη παίγνια εκτεταμένης μορφής βασική προϋπόθεση αποτελεί οι παίκτες να έχουν πλήρη γνώση των προηγούμενων αποφάσεων που έχουν ληφθεί. Δηλαδή πρόκειται για παίγνια όπου οι παίκτες είναι πλήρως πληροφορημένοι (complete

information games). Για την περιγραφή παιγνίων όπου οι παίκτες ενεργούν ταυτόχρονα, παιγνίων όπου οι παίκτες ενεργούν σειριακά αλλά δεν έχουν πλήρη γνώση όσων έχουν προηγηθεί ή ακόμα και παιγνίων όπου οι παίκτες ενεργούν διαδοχικά και υπεισέρχεται κάποιας μορφής τυχαιότητα (π.χ. η Φύση θεωρείται ένας παίκτης που διαλέγει τυχαία ορισμένους κόμβους), χρησιμοποιείται μία διαφορετική μαθηματική διατύπωση.

Παίγνια Εκτεταμένης Μορφής με Ατελή Πληροφόρηση

Ένα παίγνιο εκτεταμένης μορφής με ατελή πληροφόρηση είναι μία εννεάδα της μορφής:

$$\mathcal{G} = \left(\mathcal{K}, \mathcal{V}, v_{root}, \pi, \mathcal{V}_0, \{q_j^0\}_{j \in \mathcal{V}_0}, \{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \{W_i^k\}_{k \in \{1, \dots, k_i\}}, \underline{u} \right) \quad (4.4)$$

όπου $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ είναι το σύνολο των παικτών, $(\mathcal{V}, v_{root}, \pi)$ ένα δένδρο, \mathcal{V}_0 το σύνολο των κόμβων που σχετίζονται με τον παίκτη 0 (Φύση), $\forall j \in \mathcal{V}_0$ q_j^0 είναι η πιθανότητα επιλογής του κόμβου j από τον παίκτη 0, $\{\mathcal{V}_i\}_{i \in \mathcal{K}}$ μία διαμέριση του \mathcal{V} , W_i^k αντιστοιχεί στη διαμέριση \mathcal{V}_i και ορίζει τη δομή της πληροφορίας για τον παίκτη i και \underline{u} είναι η συνάρτηση που δίνει τα τελικά οφέλη των K παικτών ($\underline{u} = (u_1, \dots, u_K)$).

Υπάρχει ένα μοναδικό παίγνιο στρατηγικής μορφής που αντιστοιχεί σε δεδομένο παίγνιο εκτεταμένης μορφής. Το αντίθετο, ωστόσο, δεν ισχύει. Είναι δυνατό να υπάρχουν πολλά παίγνια εκτεταμένης μορφής που σχετίζονται με δεδομένο παίγνιο στρατηγικής μορφής.

4.1.2 Κατηγοριοποίηση Παιγνίων

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες είναι δυνατό να ενταχθούν τα παίγνια είναι οι εξής:

- Στατικά και δυναμικά παίγνια.

Στα δυναμικά παίγνια θεωρείται ότι οι παίκτες μπορούν να εξάγουν πληροφορία από ενέργειες που έχουν προηγηθεί. Με βάση την πληροφορία αυτή προσαρμόζουν τις επόμενες κινήσεις τους. Αντίθετα, στα στατικά παίγνια οι παίκτες έχουν στη διάθεσή τους κάποια γνώση, για την

πληροφόρηση και για τη συμπεριφορά των παικτών, η οποία μένει αμετάβλητη.

- Μη στοχαστικά και στοχαστικά παίγνια.

Το βασικό χαρακτηριστικό των στοχαστικών παιγνίων είναι η εμπλοκή στο παίγνιο μεγέθους το οποίο μεταβάλλεται με το χρόνο.

- Μη συνεργατικά και συνεργατικά παίγνια.

Στα μη συνεργατικά παίγνια είναι δυνατό να ορισθούν ατομικοί στόχοι και στρατηγικές για κάθε παίκτη. Αντιθέτως, στα συνεργατικά παίγνια αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό. Στην περίπτωση αυτή οι παίκτες σχηματίζουν συνήθως ομάδες (συνελίξεις) και διαμορφώνουν τις στρατηγικές τους με στόχο τη μεγιστοποίηση του ομαδικού οφέλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί κάποιας μορφής συνεργασία ακόμα και στην περίπτωση μη συνεργατικών παιγνίων, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση επαναλαμβανόμενων παιγνίων όπου οι παίκτες με βάση τις προηγούμενες κινήσεις των υπολοίπων παικτών προσαρμόζουν τη μελλοντική στρατηγική τους.

- Παίγνια με πλήρη πληροφόρηση και παίγνια με μη πλήρη πληροφόρηση.

Στα παίγνια με πλήρη πληροφόρηση θεωρείται ότι τα δεδομένα του παιγνίου είναι γνωστά σε όλους. Δηλαδή, σε ένα παίγνιο στρατηγικής μορφής για παράδειγμα, οι στρατηγικές και οι συναρτήσεις οφέλους κάθε παίκτη είναι γνωστές σε όλους. Αυτό σημαίνει ότι κάθε παίκτης γνωρίζει τα δεδομένα του παιγνίου, κάθε παίκτης γνωρίζει ότι οι υπόλοιποι παίκτες γνωρίζουν τα δεδομένα του παιγνίου, κάθε παίκτης γνωρίζει ότι κάθε παίκτης γνωρίζει ότι κάθε παίκτης γνωρίζει τα δεδομένα του παιγνίου κ. ό. κ.. Αντίθετα, στα παίγνια με μη πλήρη πληροφόρηση (γνωστά και ως Bayesian παίγνια), οι παίκτες έχουν μόνο μερική πληροφόρηση για το παίγνιο. Αν και τα παίγνια με μη πλήρη πληροφόρηση προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα και οι δύο κατηγορίες παιγνίων βρίσκουν εφαρμογή στην πράξη.

- Παίγνια με τέλεια πληροφόρηση και παίγνια με ατελή πληροφόρηση. Η διαφορά μεταξύ παιγνίων με τέλεια και με ατελή πληροφόρηση αναφέρθηκε

ήδη στο πλαίσιο του ορισμού των παιγνίων εκτεταμένης μορφής. Όταν όλοι οι παίκτες γνωρίζουν ακριβώς την ιστορία του παιγνίου, δηλαδή όποιες ενέργειες έχουν προηγηθεί, το παίγνιο χαρακτηρίζεται ως τέλειας πληροφόρησης. Στην αντίθετη περίπτωση το παίγνιο χαρακτηρίζεται ως ατελούς πληροφόρησης.

- Παίγνια μηδενικού αθροίσματος και παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος.

Παίγνια μηδενικού αθροίσματος ονομάζονται τα παίγνια στα οποία το άθροισμα των οφελών των παικτών υπό οποιαδήποτε έκβαση του παιγνίου είναι ίσο με το μηδέν. Ποιοτικά αυτό σημαίνει πως όταν ένας παίκτης ωφελείται, ένας άλλος αναγκαστικά ζημιώνεται. Στην αντίθετη περίπτωση, τα παίγνια χαρακτηρίζονται ως μη μηδενικού αθροίσματος.

4.2 Η Έννοια της Στρατηγικής στη Θεωρία Παιγνίων

4.2.1 Ανόθευτες Στρατηγικές και Μικτές Στρατηγικές Παικτών

Προφίλ Ενεργειών

Έστω $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ το σύνολο των παικτών. Έστω επίσης ότι $\{\mathcal{A}_i\}_{i \in \mathcal{K}}$ τα διαφορετικά σύνολα ενεργειών αυτών των παικτών. Το διάνυσμα των ενεργειών $\underline{a} = (a_1, \dots, a_K) \in \mathcal{A}$, όπου $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \dots \times \mathcal{A}_K$, ονομάζεται προφίλ ενεργειών.

Οι έννοιες «ενέργεια» και «στρατηγική» ενός παίκτη δεν ταυτίζονται. Συγκεκριμένα, οι έννοιες αυτές ταυτίζονται όταν πρόκειται για *ανόθευτη στρατηγική* (*pure strategy*). Δηλαδή, μόνο όταν ο παίκτης αντιστοιχεί πιθανότητα ίση με 1 στις επιλογές ενεργειών που έχει. Ωστόσο, ένας παίκτης μπορεί να επιλέξει ως πλέον συμφέρουσα στρατηγική ένα μίγμα των διαθέσιμων ενεργειών του. Στην περίπτωση αυτή ο παίκτης επιλέγει μία *μικτή στρατηγική*. Για να καταστούν σαφή τα ανωτέρω ακολουθεί ο ορισμός των μικτών στρατηγικών.

Μικτή Στρατηγική (Mixed Strategy)

Μία μικτή στρατηγική p_i ενός παίκτη i είναι μια κατανομή πιθανότητας επί των δυνατών ενεργειών του (ανόθευτες στρατηγικές). Συμβολίζεται με $p_i \in \Delta(\mathcal{A}_i)$ όπου $\Delta(\mathcal{X})$ είναι το $(|\mathcal{X}| - 1)$ διάστασης unit simplex που αντιστοιχεί στο σύνολο $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_{|\mathcal{X}|}\}$: $\Delta(\mathcal{X}) = \{(p_1, \dots, p_{|\mathcal{X}|}) \in \mathbb{R}_+^{|\mathcal{X}|}, \sum_{l=1}^{|\mathcal{X}|} p_l = 1\}$.

Προφίλ Μικτών Στρατηγικών-Ορισμός:

Με βάση τους δύο προηγούμενους ορισμούς, ένα προφίλ μικτών στρατηγικών ορίζεται ως $\underline{\rho} = (\rho_1, \dots, \rho_K) \in \Delta(\mathcal{A}_1) \times \Delta(\mathcal{A}_2) \times \dots \times \Delta(\mathcal{A}_K)$.

4.2.2 Κυρίαρχη Στρατηγική

Κυρίαρχη Στρατηγική (Dominant Strategy)-Ορισμός

Έστω ένα παίγνιο \mathcal{G} στρατηγικής μορφής $\mathcal{G} = (\mathcal{K}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{K}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{K}})$. Η στρατηγική \hat{s}_i είναι κυρίαρχη στρατηγική για τον παίκτη i εφόσον:

$$\forall \underline{s}_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}, \forall s_i \in \mathcal{S}_i, u_i(\hat{s}_i, \underline{s}_{-i}) \geq u_i(s_i, \underline{s}_{-i}) \quad (4.5)$$

όπου \underline{s}_{-i} είναι το προφίλ των στρατηγικών όλων των παικτών εξαιρουμένου του παίκτη i .

Μάλιστα όταν το « \geq » μπορεί να αντικατασταθεί από το « $>$ » η στρατηγική χαρακτηρίζεται ως αυστηρά κυρίαρχη.

Η έννοια της κυρίαρχης στρατηγικής είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη των στρατηγικών που θα επιλεγούν από λογικούς παίκτες.

Λογικός Παίκτης-Ορισμός

Ένας παίκτης χαρακτηρίζεται ως λογικός όταν μεγιστοποιεί το όφελός του λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των πληροφοριών που διαθέτει για το παίγνιο (von Neumann και Morgenstren, 1944; Savage, 1954). Ένας λογικός παίκτης επιλέγει πάντοτε την κυρίαρχη στρατηγική του, εφόσον αυτή υπάρχει. Για παράδειγμα, όπως φάνηκε στο παίγνιο «Δίλημμα των Φυλακισμένων», οι παίκτες 1 και 2 είχαν ως κυρίαρχη στρατηγική το «Ομολογία». Οπότε, η αστυνομία, θεωρώντας ότι οι παίκτες είναι λογικοί, εξασφάλισε ότι και οι δύο κρατούμενοι θα ομολογήσουν.

4.3 Ισοροπία στη Θεωρία Παιγνίων

Ισοροπία Nash

Έστω ότι οι στρατηγικές ενός παιγνίου ορίζονται στο $\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \times \dots \times \mathcal{S}_K$. Έστω ότι η συνάρτηση οφέλους κάθε παίκτη $i \in \mathcal{K}$ δίνεται από την $u_i: \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$. Το προφίλ στρατηγικών \underline{s}^* χαρακτηρίζεται ως ισοροπία Nash όταν:

$$\forall i \in \mathcal{K}, \forall s_i \in \mathcal{D}_i, u_i(s_i^*, \underline{s}_{-i}^*) \geq u_i(s_i, \underline{s}_{-i}^*) \quad (4.6)$$

Μάλιστα, όταν το « \geq » μπορεί να αντικατασταθεί από το « $>$ » η ισορροπία χαρακτηρίζεται ως αυστηρή ισορροπία. Επομένως, μία ισορροπία Nash είναι ένα προφίλ στρατηγικών \underline{s}^* με την ιδιότητα ότι κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του επιλέγοντας μια ενέργεια διαφορετική από αυτή στο προφίλ \underline{s}^* δεδομένου ότι οι υπόλοιποι παίκτες δεν θα μεταβάλουν τη στρατηγική τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΤΙΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Καθημερινά, όλοι οι άνθρωποι εμπλέκονται σε καταστάσεις των οποίων η έκβαση δεν εξαρτάται μόνο από τις πράξεις των ίδιων. Παραδείγματα τέτοιων καταστάσεων αποτελούν οι δημοπρασίες στο Διαδίκτυο, οι βουλευτικές εκλογές, η διαπραγμάτευση της τιμής ενός προϊόντος με ένα πωλητή σε ένα κατάστημα ή ακόμα και η αναζήτηση θέσης στο μετρό. Όλες αυτές οι καταστάσεις είναι δυνατό να αντιμετωπισθούν ως παίγνια με τη βοήθεια της Θεωρίας Παιγνίων. Η ευρεία χρήση της Θεωρίας Παιγνίων την έχει καταστήσει ένα συχνά χρησιμοποιούμενο τρόπο διατύπωσης προβλημάτων σε επιστήμες, όπως τα Οικονομικά, η Πολιτική, η Βιολογία. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, με την *ανάπτυξη κατανεμημένων δικτυωμένων συστημάτων*, έχει βρει μεγάλη εφαρμογή στις Τηλεπικοινωνίες και την Πληροφορική. Οι παίκτες στα παίγνια αυτά είναι μηχανές, όπως σταθμοί βάσης, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, δρομολογητές (routers), εξυπηρετητές (routers). Οι αποφάσεις των παικτών μπορεί να αφορούν για παράδειγμα την επιλογή του κόμβου του δικτύου στον οποίο θα προωθήσουν τα πακέτα που έχουν στη διάθεσή τους ή τον τρόπο με τον οποίο θα μοιραστούν δίκαια διάφοροι πόροι του δικτύου, όπως το εύρος ζώνης.

Η εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων για την επίλυση τηλεπικοινωνιακών προβλημάτων φαίνεται να προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Benoît Mandelbrot το 1952. Την τελευταία δεκαετία η Θεωρία Παιγνίων έχει χρησιμοποιηθεί πολύ στο χώρο των Ασύρματων Επικοινωνιών. Οι πλέον χαρακτηριστικές εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί η Θεωρία Παιγνίων είναι οι εξής:

- Δίκτυα Ειδικού Σκοπού (Ad hoc δίκτυα)

Τα δίκτυα ad hoc δεν βασίζονται σε κάποια προϋπάρχουσα υποδομή, όπως δρομολογητές στα ενσύρματα δίκτυα ή ασύρματα σημεία πρόσβασης στα διαχειριζόμενα ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα, κάθε κόμβος λαμβάνει μέρος στη δρομολόγηση προωθώντας τα δεδομένα προς τους άλλους κόμβους. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο προσδιορισμός του ποιοί κόμβοι προωθούν δεδομένα γίνεται δυναμικά με βάση τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Δηλαδή στα δίκτυα αυτά οι ίδιοι οι κόμβοι πρέπει να επιλέγουν την πολιτική δρομολόγησης.

- Γνωστικές ραδιοσυσκευές (Cognitive radio)
 Η φασματική συμφόρηση είναι ένα πρόβλημα που με την πάροδο του χρόνου γίνεται εντονότερο. Με σκοπό την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών των ΗΠΑ (Federal Communications Commission) δημοσίευσε μία αναφορά το 2002 (FCC 2002) παρέχοντας το νομικό υπόβαθρο για την υλοποίηση δικτύων με γνωστικά τερματικά. Η βασική ιδέα των γνωστικών ραδιοσυσκευών είναι ότι το τερματικό είναι σε θέση να ανιχνεύει τους διαθέσιμους τηλεπικοινωνιακούς πόρους και να προσαρμόζεται αντίστοιχα. Δηλαδή τα τερματικά πρέπει να λαμβάνουν αποφάσεις για το πώς θα χρησιμοποιήσουν το εκάστοτε διαθέσιμο φάσμα.
- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
 Μία εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων εξετάζεται σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία στο Κεφ. 6. Γενικά, η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα WSN για πολλούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα για να επιτευχθεί συναίνεση μεταξύ των κόμβων σχετικά με τις εκτιμώμενες ποσότητες. Γενικά, στα WSN οι κόμβοι πρέπει να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με τις εκτιμήσεις των μεγεθών που ενδιαφέρουν και σχετικά με το ποιά δεδομένα και πώς θα προωθηθούν στους γειτονικούς κόμβους.
- Χρήση μη Αδειοδοτημένων Συχνοτήτων
 Οι μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων δεν αποτελούν ιδιοκτησία κάποιου διαχειριστή και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα. Τυπικά, είναι δυνατό να υπάρχουν πολλές ζεύξεις σημείου προς σημείο που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, στην ίδια περιοχή και κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Ακόμα και όταν τα τερματικά δεν είναι γνωστικά, οι σχεδιαστές τερματικών που λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων πρέπει να φροντίζουν να αντιμετωπίζονται οι παρεμβολές.

Σε όλες αυτές τις εφαρμογές τα τερματικά είναι αυτόνομα ως προς τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και είναι πιθανό να μοιράζονται κοινούς πόρους όπως ενέργεια, εύρος ζώνης, διαδρομές δρομολόγησης ή χρόνο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λειτουργία των κόμβων ενός ασυρμάτου δικτύου ως ευφυών οντοτήτων που μπορούν να παρατηρούν τη δομή του δικτύου που τους περιβάλλει και να αντιδρά είναι αρκετά

ρεαλιστική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πρόοδο που έχει πραγματοποιηθεί στην επεξεργασία σήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΑΝΑΠΥΞΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στη μελέτη αυτή θεωρείται ένα WSN στο οποίο πραγματοποιείται συνάθροιση με χρήση του αλγορίθμου TAG που παρουσιάστηκε στο εδ.3.2 και προτείνεται μία εναλλακτική στρατηγική χρονισμού προκειμένου να αντιμετωπισθούν WSN στα οποία υπάρχει περιορισμός ως προς το χρόνο απόκρισης του δικτύου (latency). Η υλοποίηση της εναλλακτικής αυτής στρατηγικής χρονισμού είναι βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η φάση της κατανομής του αλγορίθμου TAG κατά την οποία δημιουργείται το δένδρο συνάθροισης παραμένει αναλλοίωτη. Ωστόσο, προτείνεται μία εναλλακτική υλοποίηση της στρατηγικής χρονισμού της φάσης συλλογής. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο κάθε WS του WSN είναι ένας παίκτης ο οποίος, κάθε φορά που λαμβάνει πακέτο από κάποιο κόμβο-παιδί του, πρέπει να αποφασίζει ποια είναι η συμφέρουσα στρατηγική: να στείλει το συναθροισμένο πακέτο με τα πακέτα που έχει συγκεντρώσει μέχρι τη δεδομένη στιγμή ή να περιμένει για να λάβει και άλλα πακέτα.

Υπενθυμίζεται ότι ο αλγόριθμος TAG χρησιμοποιεί δενδρικές δομές για την προώθηση των πακέτων των WS στον κόμβο-συλλέκτη. Επιπλέον, είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές συνεχούς παρακολούθησης, δηλαδή για εφαρμογές στις οποίες όλοι οι WS παράγουν πληροφορία κατά περιοδικό τρόπο.

Η στρατηγική χρονισμού του αλγορίθμου TAG είναι περιοδική, προσαρμοζόμενη ανά βήμα. Δηλαδή, κάθε WS προωθεί το αποτέλεσμα της συνάθροισης όταν έχει λάβει πακέτα από όλα τα παιδιά του. Η στρατηγική αυτή προϋποθέτει ότι κάθε κόμβος γνωρίζει το πλήθος των παιδιών του. Επίσης, ορίζεται ένα μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να αναμένει ένας κόμβος για να λάβει πακέτα από τα παιδιά του προκειμένου να αντιμετωπισθεί το ενδεχόμενο της απώλειας ορισμένων πακέτων. Το μέγιστο αυτό χρονικό διάστημα προσαρμόζεται για κάθε WS ανάλογα με τη θέση του στο δένδρο κατά μήκος του οποίου γίνεται η συλλογή των δεδομένων.

Επαναλαμβάνεται ότι στην παρούσα μελέτη δεν θα χρησιμοποιηθεί αυτή η στρατηγική χρονισμού. Προτείνεται, ωστόσο, μια εναλλακτική στρατηγική χρονισμού βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων.

6.1 Διατύπωση του Προβλήματος

Θεωρείται ένα WSN όπου οι WS μετρούν περιοδικά ανά T λεπτά (minutes). Ακόμα, θεωρείται ότι η συνάρτηση συνάθροισης που πραγματοποιείται στους WS είναι μία απλή συνάρτηση συνάθροισης όπως για παράδειγμα αυτή του μέσου όρου (average), της ελάχιστης τιμής (minimum) ή της μέγιστης τιμής (maximum) των μετρήσεων. Τέλος, το δίκτυο περιορίζεται από ένα μέγιστο επιτρεπτό χρόνο απόκρισης (maximum latency) T_{max} που αποτελεί και την προδιαγραφή της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS).

Όταν εκτελεσθεί η φάση κατανομής του αλγορίθμου, ο κόμβος-συλλέκτης γνωρίζει το μέγιστο πλήθος των βημάτων (hops) που απέχει από τον πλέον απομακρυσμένο κόμβο του WSN και με βάση αυτό υπολογίζει το μέγιστο χρονικό διάστημα τ που μπορεί να περιμένει ένας WS, αφού λάβει το πρώτο πακέτο, μέχρι να στείλει στον κόμβο-πατέρα του προκειμένου να ικανοποιείται η ποιότητα υπηρεσίας. Το χρονικό διάστημα τ υπολογίζεται με χρήση της σχέσης

$$T_{max} = (\text{μέγιστο πλήθος βημάτων} - 1) * \tau \quad (6.1)$$

Άρα:

$$\tau = \frac{T_{max}}{(\text{μέγιστο πλήθος βημάτων} - 1)} \quad (6.2)$$

Στο χρονικό διάστημα $t \in [0, \tau]$ ο WS συγκεντρώνει τα πακέτα που λαμβάνει από τους κόμβους-παιδιά του και από τις δικές του μετρήσεις.

Σημείωση 1: Γενικά, οι αλγόριθμοι για τη δημιουργία των δένδρων συνάθροισης έχουν ως αποτέλεσμα σχετικά συμμετρικά δένδρα με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η θεώρηση ότι δεν υπάρχει κίνδυνος εκτίμησης υπερβολικά μικρού τ λόγω ενός μόνο WS ο οποίος απέχει πολλά βήματα από τον κόμβο-συλλέκτη.

Σημείωση 2: Ο περιορισμός στο τ όπως εκφράζεται από τη Σχ. 6.2 εκτός από το ότι εξυπηρετεί στο να ικανοποιηθεί το QoS του δικτύου συμβάλλει και στο να μην υπάρχει κίνδυνος για άπειρη αναμονή από ένα WS για τη λήψη πακέτου από κάποιον από τους κόμβους-παιδιά του σε περίπτωση αποτυχημένης αποστολής.

Η ιδέα της στρατηγικής χρονισμού που υλοποιήθηκε βασίζεται στο γεγονός ότι είναι επιθυμητό ένας WS, αφού λάβει το πρώτο του πακέτο, είτε από δική του μέτρηση είτε

από κάποιο από τα παιδιά του, να μην αποστείλει αμέσως αλλά να περιμένει για να συναθροίσει όσο το δυνατό περισσότερα πακέτα, τα οποία, στη συνέχεια, θα στείλει ως ένα πακέτο στον κόμβο-πατέρα του. Ο λόγος για τον οποίο αυτό είναι επιθυμητό είναι για να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας αφού αποφεύγεται ένας αριθμός εκπομπών. Υπενθυμίζεται ότι η εκπομπή είναι η περισσότερο ενεργειακά δαπανηρή δραστηριότητα ενός WS. Ωστόσο, υπάρχει ένα όριο τ στο χρονικό διάστημα αναμονής ενός κόμβου πριν στείλει το συναθροισμένο πακέτο. Επίσης, όσο ταχύτερα αποστέλλει ένας WS στον κόμβο-πατέρα του το πακέτο που έχει, τόσο περισσότερο πρόσφατες θα είναι, επομένως και μεγαλύτερη αξία θα έχουν οι πληροφορίες που θα φθάσουν στον κόμβο-συλλέκτη.

Προκύπτει λοιπόν ένας συμβιβασμός (trade-off) ως προς το χρονικό διάστημα αναμονής ενός WS αφού λάβει το πρώτο πακέτο μέχρι να αποστείλει στον κόμβο-πατέρα του. Το χρονικό αυτό διάστημα πρέπει να γίνει μεγαλύτερο για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας του WS, ενώ πρέπει να γίνει μικρότερο προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα υπηρεσίας των μετρήσεων.

Για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου συμβιβασμού των δύο απαιτήσεων περιγράφεται μαθηματικά η αλληλεπίδραση ενός WS με τους K κόμβους-παιδιά του ως ένα παίγνιο. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά οποιονδήποτε WS του WSN εκτός από τους κόμβους-φύλλα του δένδρου συνάθροισης αφού αυτοί δεν έχουν κόμβους-παιδιά. Θεωρείται ότι οι κόμβοι αυτοί αποστέλλουν τα πακέτα τους αμέσως αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της αίσθησης-μέτρησης. Επίσης, από την ανάλυση αυτή είναι φανερό ότι εξαιρείται και ο κόμβος-συλλέκτης αφού θεωρείται ότι αυτός δεν προωθεί τα πακέτα που λαμβάνει σε κάποια άλλη οντότητα.

6.2 Ανάλυση

Για τη μαθηματική περιγραφή της αλληλεπίδρασης ενός WS με τους K κόμβους-παιδιά του υπό μορφή παιγνίου, αρχικά, πρέπει αρχικά να προσδιορισθεί η συνάρτηση οφέλους (utility function) για τον κόμβο-πατέρα. Η συνάρτηση οφέλους (βλέπε εδ.4.1.1) ποσοτικοποιεί τους δύο αντικρουόμενους στόχους του WS και εκφράζεται ως γινόμενο δύο συνιστωσών. Η πρώτη είναι το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS metric) και η δεύτερη είναι το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας (power metric).

Το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS metric)

Το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS metric) είναι μία φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου $q(t)$ με $t \in [0, \tau]$. Στη μελέτη αυτή θεωρείται ότι η $q(t)$ έχει τη μορφή μιας κανονικής κατανομής. Η διασπορά σ_τ υποδεικνύει τη χρονική συσχέτιση (βλέπε Κεφ.2) μεταξύ των μετρήσεων ενός WS όπως προκύπτει από την παρατήρηση του εκάστοτε υπό παρακολούθηση φυσικού φαινομένου. Ο δείκτης QoS q ($0 < q < 1$) καθορίζει την ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας που επιτυγχάνεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνατής. Η μέγιστη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας αποδίδεται όταν ο WS προωθεί αμέσως στον κόμβο-πατέρα του όποια πακέτα λαμβάνει, δηλαδή αποδίδεται για $t=0$. Η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας q αποδίδεται όταν ο WS προωθεί στον κόμβο-πατέρα του το συναθροισμένο πακέτο μετά από τ λεπτά από την λήψη του πρώτου πακέτου. Με βάση τα ανωτέρω το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας είναι δυνατό να εκφρασθεί υπό τη μορφή:

$$q(t) = \begin{cases} Q(t), & Q(t) \geq q \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου

$$Q(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\tau^2}} \quad (6.4)$$

Όπως προαναφέρθηκε η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας q αποδίδεται όταν ο WS προωθεί στον κόμβο-πατέρα του το συναθροισμένο πακέτο μετά από τ λεπτά από τη λήψη του πρώτου πακέτου. Επομένως

$$q = Q(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{2\sigma_\tau^2}} \Rightarrow \tau = \sigma_\tau \sqrt{2 \ln(1/q)} \quad (6.5)$$

Δεδομένου του τ από τη Σχ. 6.2 που λαμβάνει υπόψη το πλήθος των επιπέδων του δένδρου συνάθροισης που δημιουργείται κατά τη φάση κατανομής, προσδιορίζεται το σ_τ που σχετίζεται με τη χρονική συσχέτιση που εμφανίζει το εκάστοτε υπό παρατήρηση φαινόμενο και την ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας εκφρασμένη ως ποσοστό της μέγιστης δυνατής. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το ποσοστό q τόσο καλύτερη είναι η λειτουργία του δικτύου.

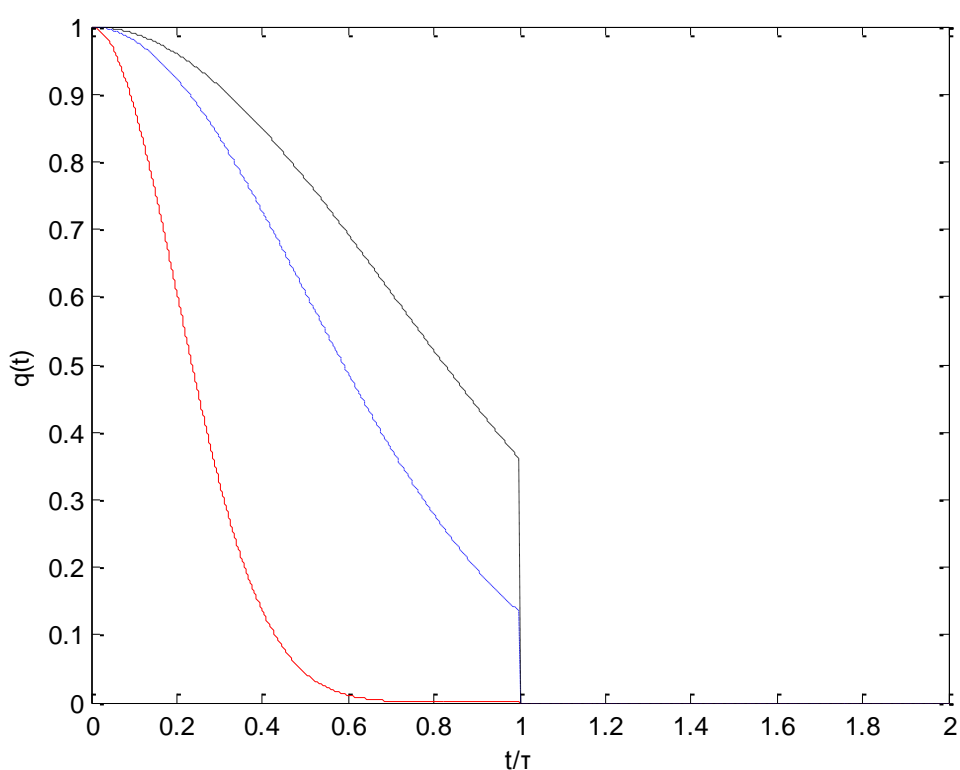
Υπό δεδομένο q , όσο μεγαλύτερο είναι το σ_τ τόσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να περιμένει ένας WS πριν εκπέμψει. Επομένως, όσο

μεγαλύτερη η τιμή του σ_τ τόσο λιγότερο συσχετισμένες είναι διαδοχικές μετρήσεις ενός WS.

Η (6.3) μπορεί να ξαναγραφεί με τη μορφή:

$$q(t, \sigma_\tau) = \begin{cases} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\tau^2}} & , t \leq \tau \\ 0 & , \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.6)$$

Στο Σχ. 6.1 απεικονίζεται το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας για τρεις διαφορετικούς βαθμούς συσχέτισης.



Σχήμα 6.1 Γραφικές παραστάσεις του μέτρου της ποιότητας υπηρεσίας.

- (α) Η γραφική παράσταση με κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε $\sigma_\tau=0.2$.
- (β) Η γραφική παράσταση με μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε $\sigma_\tau=0.5$.
- (γ) Η γραφική παράσταση με μαύρη γραμμή αντιστοιχεί σε $\sigma_\tau=0.7$.

Το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας (power metric)

Στη μελέτη αυτή θα ακολουθηθεί το ενεργειακό μοντέλο των Shih et al. μAMPS Specific Model [32], σύμφωνα με το οποίο οι WS έχουν πέντε ενεργειακές καταστάσεις (states). Οι ενεργειακές καταστάσεις του μοντέλου καθώς και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο επεξεργαστής (Processor), ο αισθητήρας (Sensor) και ο πομποδέκτης (Radio) του WS σε καθεμία από αυτές παρουσιάζονται στον Πίν.6.1. Επιπλέον, στην τελευταία στήλη του Πίν. 6.1 αναγράφεται η συνολική ισχύς P_k που καταναλώνει ο WS σε κάθε ενεργειακή κατάσταση .

State	Processor	Sensor, A/D	Radio	P_k (mW)
Active	Active	Sense	Tx/Rx	1040
Ready	Idle	Sense	Rx	400
Monitor	Sleep	Sense	Rx	270
Observe	Sleep	Sense	Off	200
Deep Sleep	Sleep	Off	Off	10

Πίνακας 6.1 Το ενεργειακό μοντέλο των Shih et al. μAMPS Specific Model.

Στην παρούσα ανάλυση θεωρείται ότι υποστηρίζεται μόνο μία υπηρεσία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μέγεθος των πακέτων να μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Στην περίπτωση που υποστηρίζονταν περισσότερες υπηρεσίες θα υπήρχε το ενδεχόμενο να συνυπάρχουν διαφορετικά μεγέθη πακέτων. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την πιο σύνθετη μορφή του μέτρου της καταναλισκόμενης ενέργειας. Επίσης, θεωρείται ότι ο WS έχει K παιδιά. Το όφελος στην καταναλισκόμενη ενέργεια από την αναμονή του WS πριν μεταδώσει εξαρτάται από το πλήθος των πακέτων (k) που θα συμπεριλάβει στο συναθροισμένο πακέτο. Όσο περισσότερα πακέτα περιλαμβάνονται στο συναθροισμένο πακέτο τόσο περισσότερο ενεργειακά αποδοτική είναι η συμπεριφορά του WS. Όταν ο WS περιμένει για να λάβει πακέτα είτε από τους κόμβους-παιδιά του είτε από δικές του μετρήσεις πρέπει να είναι ενεργοποιημένος ο δέκτης του (Rx) και ο αισθητήρας του με το μετατροπέα A/D. Ο επεξεργαστής του WS σε αυτό το διάστημα είναι ενεργοποιημένος, αλλά δεν εκτελεί κάποια διαδικασία. Επομένως, βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση (idle). Ο τελεστής της συνάθροισης θεωρείται ότι εφαρμόζεται μία φορά στα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί, αμέσως πριν πραγματοποιηθεί η μετάδοση του συναθροισμένου πακέτου. Επομένως, όταν ο WS αναμένει να λάβει πακέτα θεωρείται ότι βρίσκεται στην ενεργειακή κατάσταση

«Ready». Όταν κριθεί ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί η εκπομπή του συναθροισμένου πακέτου (αυτό θα γίνει σαφέστερο στη συνέχεια), ο επεξεργαστής πρέπει να υλοποιήσει τη συνάθροιση των πακέτων και να εκπέμψει το συναθροισμένο πακέτο στον κόμβο-πατέρα του. Για την πραγματοποίηση αυτών των διαδικασιών πρέπει να είναι ενεργός (active) ο επεξεργαστής του WS και να ενεργοποιηθεί και ο πομπός του. Επομένως, όταν ο WS κρίνει ότι πρέπει να πραγματοποιήσει εκπομπή του συναθροισμένου πακέτου μεταβαίνει στην κατάσταση «active» Για την περίπτωση όπου το πακέτο συνάθροισης περιλαμβάνει πλήθος $k \leq K+1$ πακέτων, ο WS αποφεύγει $k-1$ μεταβάσεις στην ενεργειακή κατάσταση “active”. Το μέγιστο πλήθος των πακέτων που είναι δυνατό να συγκεντρώσει ο WS είναι $K+1$, δηλαδή ένα από τη δική του μέτρηση και K από τους K κόμβους-παιδιά του. Το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας (power metric) μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή

$$pw(k) = \frac{(k - 1) * t_{packet} * (P_{active} - P_{ready})}{1mJ}, k \leq K + 1 \quad (6.7)$$

όπου t_{packet} είναι η διάρκεια μετάδοσης ενός πακέτου και P_{active} , P_{ready} είναι οι ισχύεις που αντιστοιχούν στις καταστάσεις “active” και “ready” και αναγράφονται στον Πίν. 6.1.

Σημειώνεται ότι η διαίρεση με 1 mJ στην (6.7) εξασφαλίζει ότι το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι καθαρός αριθμός.

Επομένως, σύμφωνα με την (6.7), το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που θα κατανάλωνε ο WS αν απέστειλε αμέσως στον κόμβο-πατέρα του τα πακέτα που έχει συγκεντρώσει και της ενέργειας που καταναλώνει όταν πραγματοποιεί συνάθροιση. Δηλαδή, το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας εκφράζει το λόγω συνάθροισης όφελος ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια σε mJ.

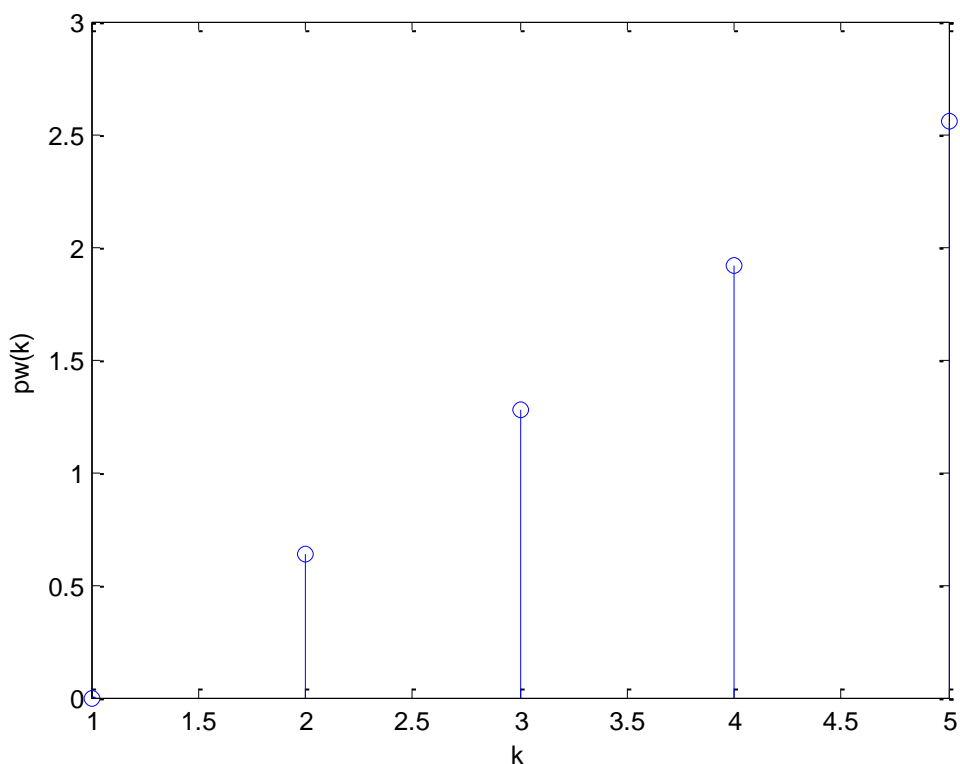
Η διάρκεια μετάδοσης πακέτου t_{packet} για ρυθμό μετάδοσης R και μέγεθος πακέτου L , δίνεται από τη σχέση:

$$t_{packet} = \frac{1}{R} * L \quad (6.8)$$

Επομένως, αν θεωρηθεί ενδεικτικά ότι $R=10$ Kbps, $L=10$ bits και ότι ο WS έχει $K=4$ κόμβους-παιδιά, το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή

$$pw(k) = 0.640 * (k - 1), \quad k \leq 5$$

Η γραφική παράσταση αυτού του μετρικού καταναλισκόμενης ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχ.6.2.



Σχήμα 6.2 Μία γραφική παράσταση του $pw(k)$ για διάρκεια πακέτου ίση προς 1 msec και δεδομένο πλήθος κόμβων-παιδιών $K=4$.

Από το Σχ. 6.2 είναι φανερό ότι όσο το k αυξάνεται τόσο μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει το μέτρο της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτό είναι λογικό αφού όσο περισσότερα πακέτα περιλαμβάνονται στο πακέτο συναθροίσεως τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται καθώς αποφεύγονται περισσότερες μεταβάσεις από την κατάσταση «ready» στην κατάσταση «active». Είναι φανερή ποιοτικά η εξάρτηση του πλήθους των πακέτων που περιλαμβάνονται στο συναθροισμένο πακέτο (k) από το χρόνο

αναμονής του WS. Είναι δηλαδή λογικό, όσο περισσότερο αναμένει ο WS έχοντας λάβει το πρώτο πακέτο τόσο περισσότερα πακέτα θα συγκεντρώσει και θα αποστείλει από κοινού συναθροισμένα σε ένα πακέτο. Επομένως, όταν ο WS επιθυμεί να γίνει ενεργειακά αποδοτικότερος πρέπει να παρατείνει το χρόνο αναμονής του.

Συνάρτηση Οφέλους του WS

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση προκύπτει ότι η συνάρτηση οφέλους είναι συνάρτηση των k , t , σ_τ και δίνεται από τη σχέση

$$u(k, t, \sigma_\tau) = \begin{cases} \frac{(k-1) * t_{packet} * (P_{active} - P_{ready})}{1mJ} * e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\tau^2}}, & t \leq \tau \text{ και } k \leq K + 1 \\ 0 & , \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.9)$$

Κάθε WS γνωρίζει πόσα πακέτα (k) έχει συγκεντρώσει καθώς και το χρόνο t που έχει παρέλθει αφού έλαβε το πρώτο πακέτο. Κάθε φορά που λαμβάνει ένα νέο πακέτο ο WS πρέπει να αξιολογήσει αν αξίζει να περιμένει και για άλλα πακέτα ή να αποστείλει όσα έχει λάβει και συναθροίσει μέχρι εκείνη τη στιγμή. Ως $t=0$ θεωρείται η χρονική στιγμή όπου λαμβάνει το πρώτο πακέτο.

Αν ένας WS τη χρονική στιγμή t λαμβάνει το k -οστό πακέτο από τους κόμβους-παιδιά του πρέπει να υπολογίσει το χρονικό διάστημα Δt για το οποίο τον συμφέρει να αναμένει ώστε να λάβει τουλάχιστον ένα ακόμα πακέτο. Το χρονικό αυτό διάστημα Δt προσδιορίζεται με χρήση της συνάρτησης οφέλους μέσω της σχέσης

$$\begin{aligned} u(k+1, t+\Delta t, \sigma_\tau) &\geq u(k, t, \sigma_\tau) \Rightarrow \\ \frac{k * t_{packet} * (P_{active} - P_{ready})}{1mJ} * e^{-\frac{(t+\Delta t)^2}{2\sigma_\tau^2}} & \\ \geq \frac{(k-1) * t_{packet} * (P_{active} - P_{ready})}{1mJ} * e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\tau^2}} &\Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{t}{\sigma_\tau^2} - \sqrt{\left(\frac{t}{\sigma_\tau^2}\right)^2 + \frac{2}{\sigma_\tau^2} \ln(k/(k-1))} / \frac{1}{\sigma_\tau^2} &\leq \Delta t \\
&\leq -\frac{t}{\sigma_\tau^2} + \sqrt{\left(\frac{t}{\sigma_\tau^2}\right)^2 + \frac{2}{\sigma_\tau^2} \ln(k/(k-1))} / \frac{1}{\sigma_\tau^2}
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Επομένως, το μέγιστο χρονικό διάστημα που συμφέρει ένα WS να αναμένει εξαρτάται από τη χρονική στιγμή $t(0 \leq t < \tau)$, το πλήθος των πακέτων που έχει ήδη λάβει ($0 \leq k \leq K$) και τη χρονική συσχέτιση που εμφανίζει το υπό παρατήρηση φαινόμενο (σ_τ) και δίνεται από την παρακάτω συνάρτηση τριών κλάδων:

$$\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau) = \begin{cases} -t + \sqrt{t^2 + 2\sigma_\tau^2 \ln(k/(k-1))} & , 2 \leq k \leq K \text{ και } 0 < t < \tau \\ \tau & , k = 1, t = 0 \\ 0 & , \text{διαφορετικά} \end{cases} \tag{6.11}$$

Το μέγιστο χρονικό διάστημα αναμονής στην περίπτωση όπου ο WS έχει λάβει μόνο ένα πακέτο, δηλαδή στην περίπτωση όπου $k=1$ και $t=0$ προκύπτει με βάση την ανωτέρω ανάλυση ίσο με άπειρο. Προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο της άπειρης αναμονής κάποιου κόμβου, ορίζεται ως μέγιστο χρονικό διάστημα αναμονής για $k=1$ και $t=0$ το $\Delta t_{max}(1, 0, \sigma_\tau) = \tau$.

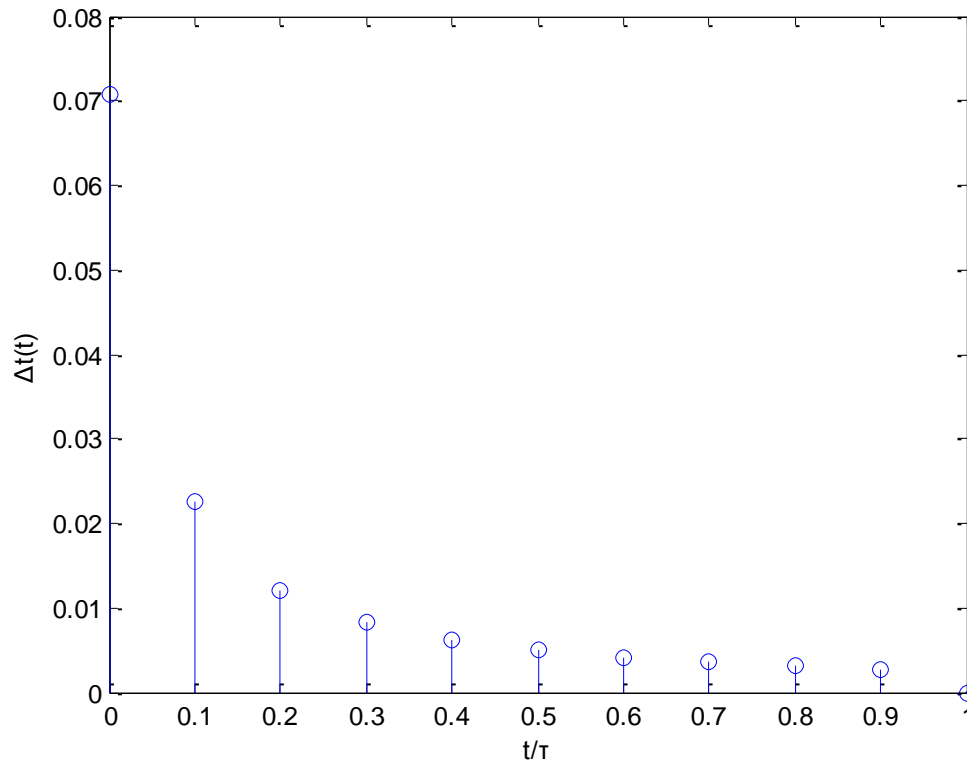
Παραγωγίζοντας τη συνάρτηση της (6.11) ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή t προκύπτει

$$\frac{\partial \Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)}{\partial t} = -1 + t / \sqrt{t^2 + 2\sigma_\tau^2 \ln(k/(k-1))} < 0 \tag{6.12}$$

Από την (6.12) φαίνεται ότι η παράγωγος της $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ ως προς το χρόνο είναι πάντα αρνητική. Δηλαδή, όσο παρέρχεται ο χρόνος αναμονής του WS από τη λήψη του πρώτου πακέτου τόσο μικραίνουν τα διαστήματα Δt κατά τα οποία συμφέρει τον WS να περιμένει και για άλλα πακέτα. Αυτό διαισθητικά είναι αναμενόμενο. Όσο αυξάνεται ο χρόνος αναμονής t του WS τόσο περισσότερα πακέτα έχει συγκεντρώσει οπότε μειώνεται το κίνητρο που έχει για να αυξήσει την ενεργειακή του απόδοση,

δηλαδή για να περιμένει. Ταυτόχρονα, όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα αναμονής μειώνεται το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας.

Στο Σχ. 6.3 παρουσιάζεται η μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει του χρόνου που έχει παρέλθει από τη λήψη του πρώτου πακέτου για $\sigma_\tau=0.5$ και $k=100$.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει του χρόνου που έχει παρέλθει από τη λήψη του πρώτου πακέτου για $\sigma_\tau=0.5$ και $k=100$.

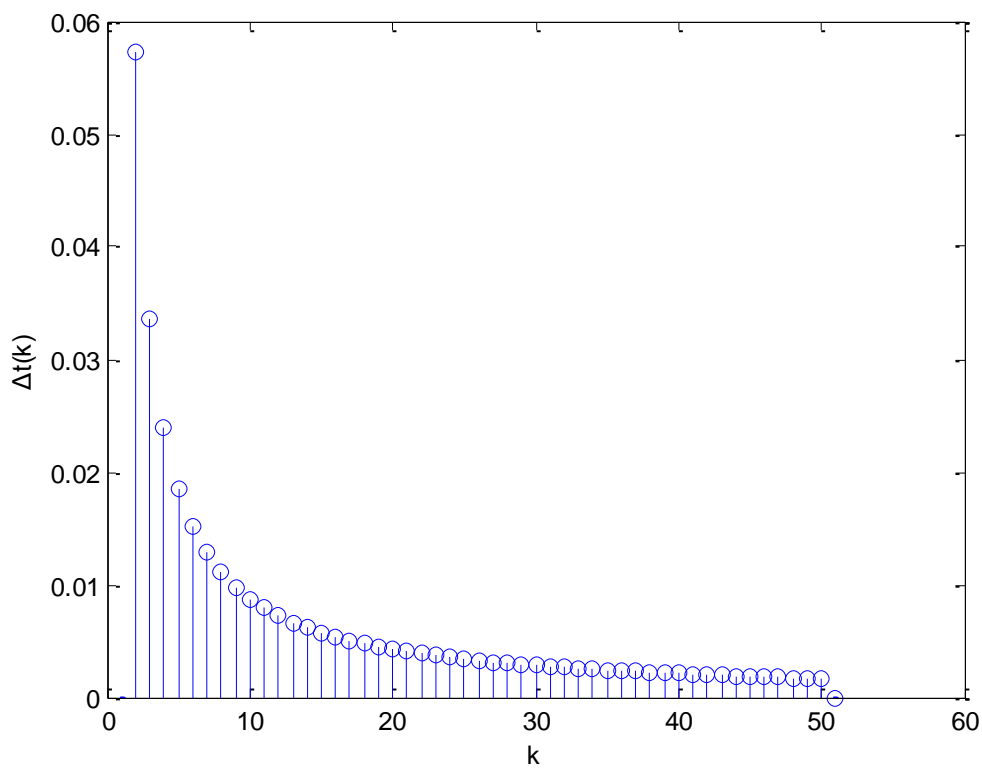
Παραγωγίζοντας τη συνάρτηση της (6.11) ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή k προκύπτει

$$\frac{\partial \Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)}{\partial k} = -\sigma_\tau^2 / k(k-1) \sqrt{t^2 + 2\sigma_\tau^2 \ln(k/(k-1))} < 0 \quad (6.13)$$

Από την (6.13) φαίνεται ότι η παράγωγος της $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ ως προς το πλήθος των πακέτων που έχει συγκεντρώσει ο WS είναι πάντα αρνητική. Δηλαδή, όσο παρέρχεται ο χρόνος αναμονής του WS από τη λήψη του πρώτου πακέτου τόσο μειώνονται τα διαστήματα Δt κατά τα οποία συμφέρει τον WS να περιμένει για τη λήψη νέων πακέτων. Αυτό διαισθητικά είναι αναμενόμενο. Όπως εξηγήθηκε και

προηγουμένως, όσο περισσότερα πακέτα έχει συγκεντρώσει ένας WS τόσο μειωμένο είναι το κίνητρο που έχει για να αυξήσει την ενεργειακή του απόδοση, ισοδύναμα για να περιμένει τη πιθανή λήψη νέων πακέτων. Επιπλέον, όταν ο WS έχει συγκεντρώσει σημαντικό πλήθος πακέτων από τους κόμβους-παιδιά του, το πιθανότερο είναι ότι ο χρόνος αναμονής του δεν έχει τιμές κοντά στο μηδέν με αποτέλεσμα το μέτρο της ποιότητας υπηρεσίας να έχει χαμηλές τιμές. Δηλαδή, όσο το k αυξάνεται ο WS αποκτά μεγαλύτερο κίνητρο για να εκπέμψει σύντομα.

Στο Σχ. 6.4 παρουσιάζεται η μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει του πλήθους των πακέτων που έχει λάβει ο κόμβος για $t=3$ min και $\sigma_\tau=0.5$.



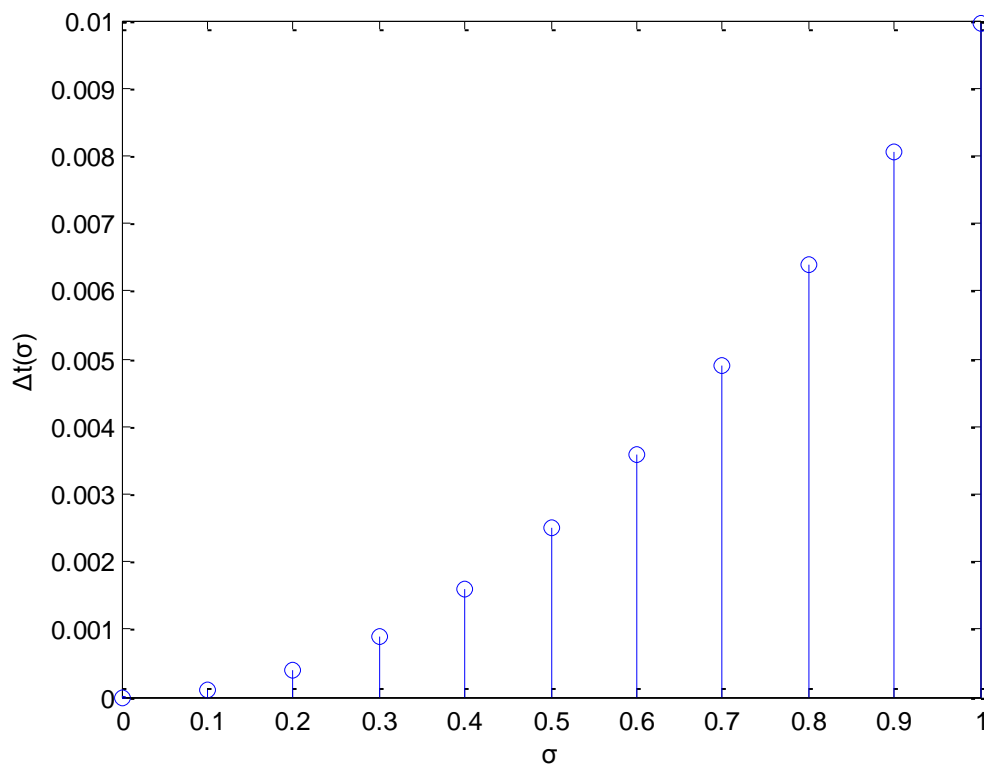
Σχήμα 6.4 Μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει του πλήθους πακέτων που έχει λάβει ο κόμβος για $t=3$ min και $\sigma_\tau=0.5$. Ο WS έχει $K=50$ κόμβους-παιδιά.

Παραγωγίζοντας τη συνάρτηση της (6.11) ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή σ_τ προκύπτει:

$$\frac{\partial \Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)}{\partial \sigma_\tau} = 2\sigma_\tau \ln(k/(k-1)) / \sqrt{t^2 + 2\sigma_\tau^2 \ln(k/(k-1))} > 0 \quad (6.14)$$

Από την (6.14) φαίνεται ότι η παράγωγος της $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_t)$ ως προς τη διασπορά σ_t είναι πάντα θετική. Δηλαδή, όσο λιγότερο συσχετισμένες χρονικά είναι οι διαδοχικές μετρήσεις ενός WS τόσο περισσότερο τον συμφέρει να περιμένει για να λάβει νέα πακέτα. Αυτό διαισθητικά είναι αναμενόμενο. Όσο λιγότερο συσχετισμένες χρονικά είναι διαδοχικές μετρήσεις ενός WSN τόσο αυξάνεται το κίνητρο που έχει ο WS να περιμένει για μεγαλύτερα διαστήματα Δt προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα να λάβει πακέτο και από τον αισθητήρα του. Επομένως, τόσο αυξάνεται το κίνητρο που έχει για να περιμένει για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της αίσθησης-μέτρησης.

Στο Σχ. 6.5 παρουσιάζεται η μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει της χρονικής συσχέτισης μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ενός κόμβου για $t=1$ min και $k=100$.



Σχήμα 6.5 Μεταβολή των διαστημάτων Δt (min) συναρτήσει της χρονικής συσχέτισης μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ενός κόμβου για $t=1$ min και $k=100$.

6.3 Διατύπωση του Προβλήματος ως Παίγνιο

Έστω ένας κόμβος και τα K παιδιά του. Θεωρούνται δύο παίκτες, έστω A και B . Ο παίκτης A είναι οι K κόμβοι-παιδιά και οι μετρήσεις του ίδιου του WS . Επί της ουσίας, περιγράφονται οι μετρήσεις του ίδιου του WS ως ένας επιπλέον κόμβος-παιδί ο οποίος αποστέλλει τις μετρήσεις του στον κόμβο-πατέρα. Ο παίκτης B είναι ο κόμβος-πατέρας ο οποίος λαμβάνει τις μετρήσεις από τα παιδιά του και τον αισθητήρα του και αποφασίζει αν θα προωθήσει συναθροισμένα όσα έχει λάβει μέχρι εκείνη τη στιγμή ή αν θα περιμένει για να λάβει και άλλα πακέτα τα οποία θα συμπεριλάβει στο συναθροισμένο πακέτο.

Είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι οι αποστολές του παίκτη A ακολουθούν κατανομή Poisson με ρυθμό λ σε κάθε διάστημα Δt . Τότε, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, δηλαδή η πιθανότητα ο A να στείλει k πακέτα σε διάστημα Δt είναι:

$$p(k) = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (6.15)$$

Άρα, η πιθανότητα να μην στείλει ο A κανένα πακέτο σε διάστημα Δt είναι ίση με:

$$p(0) = P(X = 0) = \frac{\lambda^0}{0!} e^{-\lambda} = e^{-\lambda} \quad (6.16)$$

η πιθανότητα να στείλει ο A ένα πακέτο σε διάστημα Δt είναι ίση με:

$$p(1) = P(X = 1) = \frac{\lambda^1}{1!} e^{-\lambda} = \lambda e^{-\lambda} \quad (6.17)$$

.....

πιθανότητα να στείλει ο A $K+1$ πακέτα σε διάστημα Δt είναι ίση με:

$$p(K + 1) = P(X = K + 1) = \frac{\lambda^{K+1}}{(K + 1)!} e^{-\lambda} \quad (6.18)$$

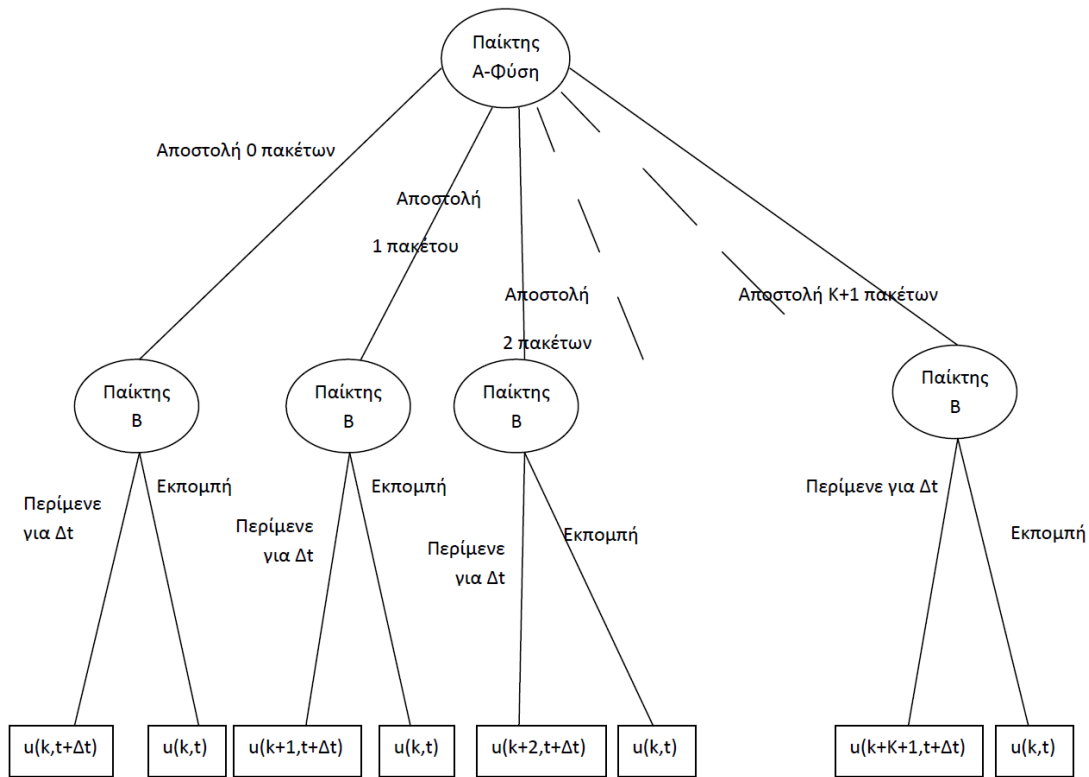
Αν θεωρηθεί ότι στη διάρκεια μιας περιόδου μέτρησης T ένας κόμβος λαμβάνει πακέτα από όλα τα παιδιά του και επίσης ολοκληρώνει ο ίδιος τη διαδικασία της μέτρησης, ισχύει:

$$\lambda = \frac{K+1}{T} \quad (6.19)$$

Επομένως, είναι δυνατό να θεωρηθεί ένα παίγνιο εκτεταμένης μορφής με μη πλήρη πληροφορία με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το σύνολο των παικτών $S=\{A,B\}$. Μάλιστα, ο παίκτης A θεωρείται ο παίκτης 0 , δηλαδή ο Παίκτης-Φύση.
- (V, V_{root}, π) είναι το δένδρο του Σχ. 6.3
- V_0 είναι το σύνολο των κόμβων που σχετίζονται με τον παίκτη 0 (βλέπε Σχ.6.3)

- $q_0^k = p(k) = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ είναι η πιθανότητα επιλογής του κόμβου k από τον παίκτη θ , δηλαδή η πιθανότητα ο παίκτης A να στείλει k πακέτα.



Σχήμα 6.3 Το δένδρο για την αναπαράσταση του παιχνιδιού εκτεταμένης μορφής.

Το παίγνιο στρατηγικής μορφής που αντιστοιχεί στο παίγνιο εκτεταμένης μορφής του Σχ. 6.3 είναι αυτό του Πίν.6.2.

A \ B	Περίμενε για Δt	Εκπομπή
Αποστολή 0 πακέτων p_0	$u(k,t+\Delta t)$	$u(k,t)$
Αποστολή 1 πακέτου p_1	$u(k+1,t+\Delta t)$	$u(k,t)$
Αποστολή 2 πακέτων p_2	$u(k+2,t+\Delta t)$	$u(k,t)$
⋮	⋮	⋮
Αποστολή $K+1$ πακέτων $p(K+1)$	$u(k+K+1,t+\Delta t)$	$u(k,t)$

Πίνακας 6.2 Το παίγνιο στρατηγικής μορφής που αντιστοιχεί στο παίγνιο εκτεταμένης μορφής του Σχ. 6.3

Η πρώτη φορά που παίζεται το παίγνιο είναι όταν ο Β λαμβάνει το πρώτο πακέτο ($t=0$). Το παίγνιο παίζεται κάθε φορά που ο Α στέλνει πακέτο.

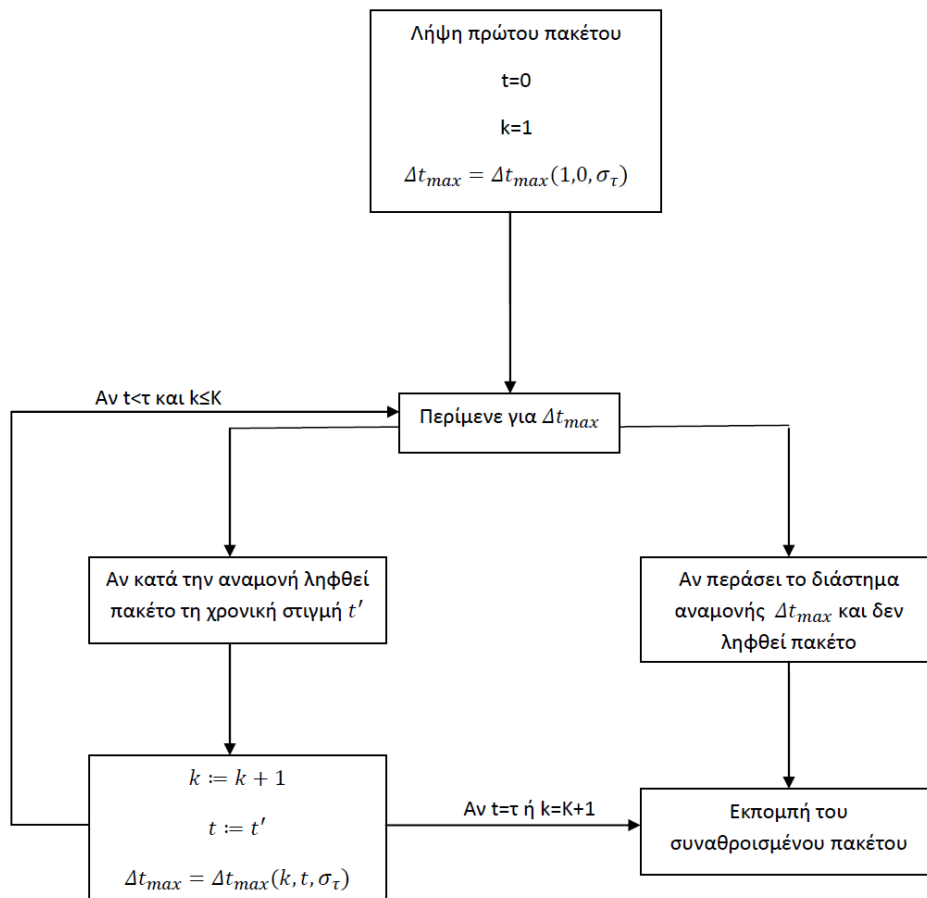
6.4 Αποτελέσματα-Προτεινόμενη Στρατηγική Χρονισμού

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε στα εδ.6.2,6.3 αναπτύσσεται ο εξής αλγόριθμος για τη στρατηγική χρονισμού:

Κάθε φορά που ο WS λαμβάνει πακέτο είτε από δική του μέτρηση είτε από τους κόμβους παιδιά του, υπολογίζει το μέγιστο χρονικό διάστημα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ που τον συμφέρει να περιμένει. Στη συνέχεια, υπάρχουν τα εξής ενδεχόμενα:

- i) Αν εντός του διαστήματος $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ ο WS λάβει ένα ή περισσότερα πακέτα, ανανεώνει τις τρέχουσες τιμές των k, t και με βάση αυτές υπολογίζει το νέο χρονικό διάστημα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$. Αν $k=K+1$ ή $t=\tau$, ο WS προωθεί στον κόμβο-πατέρα το πακέτο συνάθροισης. Διαφορετικά περιμένει για το χρονικό διάστημα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ που υπολόγισε.
- ii) Αν παρέλθει το διάστημα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ και ο WS δεν λάβει πακέτα ο WS προωθεί στον κόμβο-πατέρα το πακέτο συνάθροισης με ό, τι πακέτα έχει συγκεντρώσει προκειμένου να μην διακινδυνεύσει να μειωθεί περαιτέρω το όφελός του, όπως αυτό εκφράζεται από την (6.9).

Ο αλγόριθμος αυτός φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχ. 6.4.



Σχήμα 6.4 Αλγόριθμος για την υλοποίηση της στρατηγικής χρονισμού βασισμένος στη Θεωρία Παιγνίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη στρατηγική χρονισμού, βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων προσδίδει ευφυΐα στον κάθε κόμβο. Η βασική διαφορά σε σχέση με τη συνήθη στρατηγική χρονισμού της φάσης συλλογής του αλγορίθμου TAG είναι ότι ο WS είναι ευφυής και έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει τη συμπεριφορά του με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που υπάρχουν ως προς τη συμπεριφορά του δικτύου. Δηλαδή ο WS είναι σε θέση να βρίσκει συμβιβαστικές λύσεις προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του δικτύου τόσο για την ενεργειακή απόδοση όσο και για την ταχύτητα απόκρισης. Στην ανάλυση που προηγήθηκε στα εδ. 6.2-6.4 αν η απαίτηση ως προς την ταχύτητα απόκρισης του δικτύου ήταν διαφορετική, δηλαδή αν το μετρικό της ποιότητας υπηρεσίας εκφραζόταν από μία συνάρτηση διαφορετική από αυτήν της Σχ. 6.6 τα διαστήματα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ που θα προέκυπταν θα ήταν διαφορετικά από αυτά που δίνονται από τη Σχ. 6.11. Ακόμα στην περίπτωση όπου ενδιαφέρει περισσότερο η ενεργειακή απόδοση από τη μεγιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας (ή το αντίστροφο) είναι δυνατό να πολλαπλασιασθούν τα αντίστοιχα μετρικά με κατάλληλα βάρη με αποτέλεσμα να προσαρμοσθεί η συνάρτηση οφέλους της Σχ. 6.9. Είναι φανερό πως και σε αυτήν την περίπτωση τα χρονικά διαστήματα $\Delta t_{max}(k, t, \sigma_\tau)$ που θα προέκυπταν θα ήταν διαφορετικά από αυτά που δίνονται από τη Σχ. 6.11. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος οδηγεί σε μία έξυπνη, προσαρμοζόμενη συμπεριφορά του δικτύου στις απαιτήσεις του σχεδιαστή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ian F. Akyildiz and Mehmet Can Vuran, “Wireless Sensor Networks”, *Wiley*, pp.2-10.
- [2] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, August 2002, pp. 102-114.
- [3] E. Shih *et al.*, “Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks”, *Proc. ACM MobiCom '01*, Rome, Italy, July 2001, pp.272-286.
- [3] Simon Haykin, “Communication Systems”, *John Wiley & Sons*, pp. 281-383.
- [4] Yang Yu, Bhaskar Krishnamachari, and Victor K. Prasanna, “Energy-Latency Tradeoffs for Data Gathering in Wireless Sensor Networks”, *IEEE InfoCom*, 2004
- [5] Mehmet C. Vuran, Ozgur B. Akan, Ian F. Akyildiz, “Spatio-temporal Correlation: Theory and Applications for Wireless Sensor Networks”, *Computer Networks Journal. Elsevier*, vol.45, no.4, pp.245-259, 2004.
- [6] Thakshila Wimalajeewa, Sudharman K. Jayaweera, “Power Efficient Analog Forwarding for Correlated Data Fusion in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, June 2007, pp. 367-371.
- [7] Haifeng Hu, Zhen Yang, “Spatial Correlation-based Distributed Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Wireless Communications*, 2010.
- [8] Himanshu Gupta, Samir R. Das, Vishal Chowdhary, “Efficient Gathering of Correlated Data in Sensor Networks”, *MobiHoc' 05*, May 25-27, pp.402-413.
- [9] Razvan Critescu, Baltasar Beferull-Loazano, Martin Vetterli, “On Network Correlated Data Gathering”, *IEEE Infocom*, 2004, pp.2571-2582.
- [10] Elena Fasolo, Michele Rosi, Jorg Widmer, Michele Zorzi, “In-Network Aggregation Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey”, *IEEE Wireless Communications*, April 2007, pp. 70-87.

- [11] S. Madden *et al*, “TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks”, *OSDI 2002*, Boston MA, Dec. 2002.
- [12] Henri Dubois-Ferrière, Deborah Estrin, Martin Vetterli, “Packet Combining in Sensor Networks”, *SenSys’ 05*, November 2-4, 2005, San Diego, California, USA, pp.102-115.
- [13] Özlem Durzam Incel, Amitabha Ghosh, Bhaskar Krishnamachari, Krishnakant Chintalapudi, “Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.11, no. 1, January 2012, pp.86-99.
- [14] S. Upadhyayula, S.K.S. Gupta, “Spanning Tree Based Algorithms for Low Latency and Energy Efficient Data Aggregation Enhanced Convergecast (DAC) in Wireless Sensor Networks”, *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier*, 2006.
- [15] C. Intanagonwiwat *et al.*, “Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking”, *IEEE/ACM Trans. Net.*, vol.11, no. 1, Feb. 2002, pp.2-16.
- [16] S. Lindsey, C.Raghavendra, and K.M. Sivalingam, “Data Gathering Algorithms in Sensor Networks using Energy Metrics”, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Sys.*, vol. 13, no. 9, Sept. 2002, pp.924-35.
- [17] G. Di Bacco, T. Melodia, and F. Cuomo, “A MAC Protocol for Delay-Bounded Applications in Wireless Sensor Networks”, *Med-Hoc-Net 2004*, Bodrum, Turkey, June 2004.
- [18] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.1, no.4, Oct. 2002, pp.660-670.
- [19] Y.Yao and J. Gehrke, “Query Processing for Sensor Networks”, *ACM CIDR 2003*, Asilomar, CA, Jan. 2003.
- [20] Y.Yao and J. Gehrke, “The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks”, *ACM SIGMOD Record*, vol. 31, no.3, Sept. 2002, pp.9-18.
- [21] S. Nath *et al.*, “Synopsis Diffusion for Robust Aggregation in Sensor Networks”, *ACM SenSys 2004*, Baltimore, MD, Nov. 2004.

- [22] A. Manjhi, S. Nath, and P.G. Gibbons, “Tributaries and Delta: Efficient and Robust Aggregation in Sensor Network Stream”, *ACM SIGMOD 2005*, Baltimore, MD, June 2005.
- [23] A. Sharaf et al., “Balancing Energy Efficiency and Quality of Aggregate Data in Sensor Networks”, *VLDB J.*, vol. 13, no.4, Dec. 2004, pp.384-403.
- [24] E.Cayirci, “Data Aggregation and Dilution by Modulus Addressing in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, no.8, Aug. 2003, pp. 355-357.
- [25] T. Abdelzaher, T. He, and J. Stankovic, “Feedback Control of Data Aggregation in Sensor Networks”, *IEEE CDC’ 04*, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, Dec. 2004.
- [26] T. M. Cover and J.A. Thomas, “Elements of Information Theory”, *Wiley*, 1991.
- [27] Samson Lasaulce, Hamidou Tembine, “Game Theory and Learning for Wireless Sensor Networks”, *Elsevier*, 2011.
- [28] Drew Fudenberg, Jean Tirole, “Game Theory”, *The M.I.T. Press*, 1991.
- [29] Asu Ozdaglar, Lectures from M.I.T. Course “Game Theory with Engineering Applications”.
- [30] Matthew Jackson, Yoav Shoham, Lectures from Online Stanford Course “Game Theory”.
- [31] E. Altman, T. Boulogne, R. El-Azouzi, T. Jiménez, L. Wynter, “A Survey on Networking Games in Telecommunications”, *Computer and Operations Research*, *Elsevier*, 2006, pp. 286-311.
- [32] María Gabriela Calle Torres, “Energy Consumption in Wireless Sensor Networks Using GSP”, Pittsburgh 2006
- [33] Rajgopal Kannan and S. Sitharama Iyengar, *Fellow, IEEE*, “Game Theoretic Models for Reliable Path-Length and Energy-Constrained Routing With Data Aggregation in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.22, no.6, August 2004, pp.1141-1150
- [34] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, “Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων και Στατιστική”, *Εκδόσεις Συμμεών*, 1999

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Multi-hop σχήμα επικοινωνίας: Στο multi-hop σχήμα επικοινωνίας ο κόμβος-πηγή και ο κόμβος-προορισμός επικοινωνούν μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων κόμβων του δικτύου που λειτουργούν και ως μεταγωγείς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

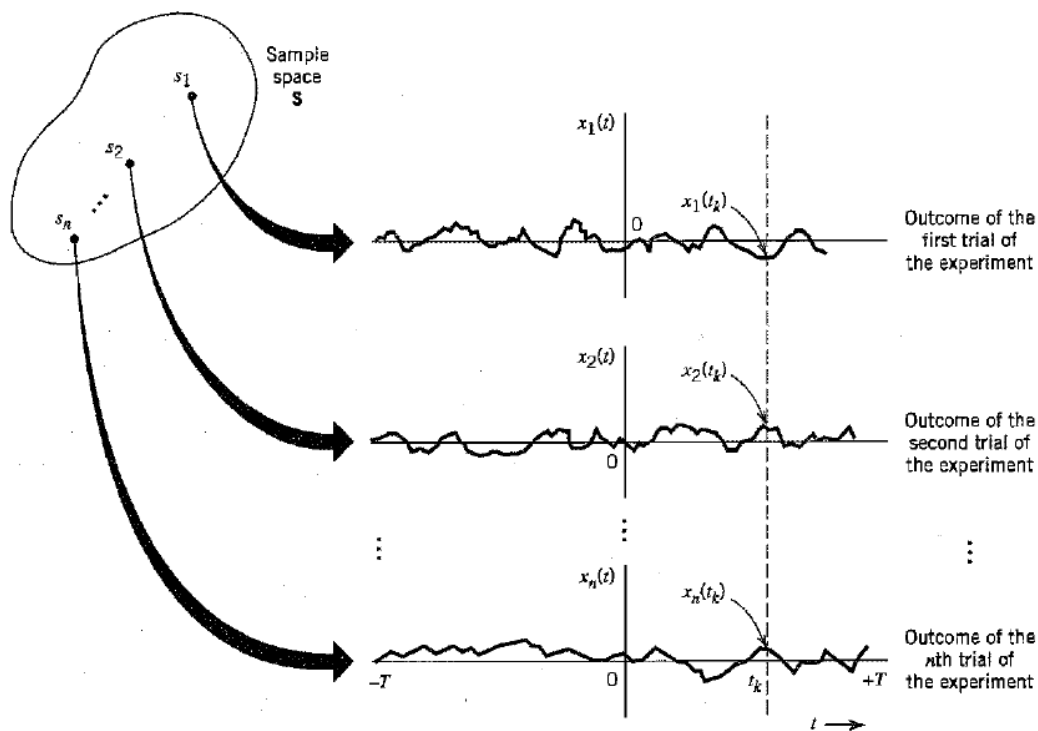
Ντετερμινιστικά σήματα: Ορίζονται ως ντετερμινιστικά σήματα (deterministic signals) τα σήματα τα οποία είναι δυνατό να περιγραφούν ως πλήρως καθορισμένες συναρτήσεις του χρόνου.

Τυχαία σήματα: Ορίζονται ως τυχαία σήματα (random signals) τα σήματα των οποίων δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί εκ των προτέρων η ακριβής τιμή. Τυχαία σήματα συναντώνται σε κάθε πρακτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Τα τυχαία σήματα περιγράφονται μέσω των στατιστικών ιδιοτήτων τους, όπως η μέση ισχύς ή η πυκνότητα φάσματος ισχύος (power spectral density).

Κάθε δείγμα στο χώρο δειγμάτων ενός κόμβου-αισθητήρα αποτελεί χρονική συνάρτηση. Ο χώρος δειγμάτων ή το σύνολο που περιλαμβάνει όλες τις πιθανές συναρτήσεις-δείγματα ονομάζεται τυχαία διαδικασία ή στοχαστική ανέλιξη. Δηλαδή, σύμφωνα με την [3] ισχύει ο ακόλουθος ορισμός:

Στοχαστική Ανέλιξη: Ως στοχαστική ανέλιξη ορίζεται ένα σύνολο συναρτήσεων μαζί με ένα κανόνα που αποδίδει μια πιθανότητα σε κάθε σημαντικό γεγονός συνδεδεμένο με την παρατήρηση μίας εκ των συναρτήσεων αυτών.

Το Σχ. Π.2.1 καθιστά πιο κατανοητή την έννοια της στοχαστικής ανέλιξης. Η στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ απεικονίζεται μέσω ενός συνόλου χρονικών συναρτήσεων δειγμάτων (sample functions) $\{x_j(t)\}$ $j=1,2,\dots,N$. Κάθε συνάρτηση δείγμα ή κυματομορφή $x_j(t)$ με πιθανότητα εμφάνισης $P(s_j)$ αντιστοιχεί στο δείγμα s_j του χώρου δειγμάτων S . Αν παρατηρηθεί το σύνολο των συναρτήσεων δειγμάτων (sample functions) $\{x_j(t)\}$, $j=1,2,\dots,N$ σε δεδομένη χρονική στιγμή t_k , καθώς κάθε $x_j(t)$ έχει πιθανότητα εμφάνισης $P(s_j)$, συνεπάγεται ότι το σύνολο $\{x_j(t_k)\}$, $j=1,2,\dots,N$ αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή. Για κάθε διαφορετική επιλογή της στιγμής παρατήρησης προκύπτει μια διαφορετική τυχαία μεταβλητή $X(t_k)$.



Σχήμα Π.2.1 Η στοχαστική ανέλιξη ως ένα σύνολο από συναρτήσεις δείγματα.

Έστω μία στοχαστική ανέλιξη $X(t)$. Εάν η στοχαστική αυτή ανέλιξη παρατηρηθεί για τις χρονικές στιγμές t_1, t_2, \dots, t_k λαμβάνονται όπως εξηγήθηκε προηγουμένως οι τυχαίες μεταβλητές $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_k)$. Η από κοινού συνάρτηση κατανομής (joint distribution function) των k αυτών τυχαίων μεταβλητών ορίζεται ως η πιθανότητα του συνδυασμένου γεγονότος $X(t_1) \leq x_1, X(t_2) \leq x_2, \dots, X(t_k) \leq x_k$, δηλαδή:

$$F_{X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_k)}(x_1, x_2, \dots, x_k) = P(X(t_1) \leq x_1, X(t_2) \leq x_2, \dots, X(t_k) \leq x_k) \quad (\text{Π. 2.1})$$

Η από κοινού συνάρτηση κατανομής μπορεί να γραφεί πιο απλοποιημένα και ως $F_{X(t)}(\mathbf{x})$ όπου

$$\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} X(t_1) \\ X(t_2) \\ \vdots \\ X(t_k) \end{pmatrix} \quad (\text{Π. 2.2})$$

και

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{pmatrix} \quad (\text{Π. 2.3})$$

Παρατηρείται πως η $F_{\mathbf{X}(t)}(\mathbf{x})$ εξαρτάται τόσο από τη στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ όσο και από τις χρονικές στιγμές $\{t_j\}$, $j=1,2,\dots,k$.

Από τα προαναφερθέντα, συνεπάγεται ότι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του τυχαίου διανύσματος $\mathbf{X}(t)$ ισούται με:

$$f_{\mathbf{X}(t)}(\mathbf{x}) = \frac{\partial^k}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_k} F_{\mathbf{X}(t)}(\mathbf{x}) \quad (\text{Π. 2.4})$$

Αυστηρά στατική (strictly stationary) ή στατική με τη στενή έννοια (stationary in the strict sense) στοχαστική ανέλιξη: Μία στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ χαρακτηρίζεται ως αυστηρά στατική όταν η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας παραμένει αμετάβλητη σε μετατοπίσεις της αρχής του χρόνου, δηλαδή αν και μόνο αν για κάθε πεπερασμένο σύνολο $\{t_j\}$, $j=1,2,\dots,k$ και για κάθε διάνυσμα \mathbf{x} και χρονική μετατόπιση T ισχύει:

$$f_{\mathbf{X}(t)}(\mathbf{x}) = f_{\mathbf{X}(t+T)}(\mathbf{x}) \quad (\text{Π. 2.5})$$

Οι στατικές στοχαστικές ανελιξεις έχουν ιδιαίτερη σημασία διότι απαντώνται συχνά στην πράξη και έχουν απλή μαθηματική περιγραφή.

Συχνά δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της συνάρτησης κατανομής μιας στοχαστικής ανελιξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις περιγράφεται μερικώς η στοχαστική ανέλιξη με χρήση των στατιστικών της ιδιοτήτων. Συχνά χρησιμοποιούμενες περιγραφές είναι η μέση τιμή, η συνάρτηση συσχέτισης και η συνάρτηση συμμεταβλητότητας της στοχαστικής ανελιξης.

Μέση τιμή στοχαστικής ανελιξης: Ορίζεται ως μέση τιμή (mean) μίας στοχαστικής ανελιξης $X(t)$ η τιμή:

$$m_X(t_k) = E[X(t_k)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{X(t_k)}(x) dx \quad (\text{Π. 2.6})$$

όπου $f_{X(t_k)}$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής $X(t_k)$, δηλαδή της παρατήρησης της στοχαστικής ανέλιξης τη χρονική στιγμή t_k .

Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης στοχαστικής ανέλιξης: Ορίζεται ως συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) μίας στοχαστικής ανέλιξης $X(t)$ η συνάρτηση δύο χρονικών μεταβλητών t_k και t_i που ορίζεται από τη σχέση:

$$R_X(t_k, t_i) = E[X(t_k), X(t_i)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xy f_{X(t_k), X(t_i)}(x, y) dx dy \quad (\text{Π. 2.7})$$

όπου $X(t_k), X(t_i)$ είναι οι τυχαίες μεταβλητές που προκύπτουν από την παρατήρηση της στοχαστικής ανέλιξης $X(t)$ κατά τις χρονικές στιγμές t_k και t_i . Η $f_{X(t_k), X(t_i)}$

είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών $X(t_k), X(t_i)$.

Συνάρτηση αυτομεταβλητότητας (autocovariance function) στοχαστικής ανέλιξης:

Ορίζεται ως συνάρτηση αυτομεταβλητότητας μίας στοχαστικής ανέλιξης $X(t)$ η συνάρτηση δύο χρονικών μεταβλητών t_k και t_i που ορίζεται από τη σχέση:

$$K_X(t_k, t_i) = E[(X(t_k) - m_X(t_k))(X(t_i) - m_X(t_i))] \quad (\text{Π. 2.8})$$

Για μία αυστηρά στατική στοχαστική ανέλιξη η μέση τιμή, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και η συνάρτηση αυτομεταβλητότητας παίρνουν τις εξής απλούστερες μορφές:

- Η μέση τιμή μιας αυστηρά στατικής στοχαστικής ανέλιξης είναι σταθερή και ανεξάρτητη της χρονικής στιγμής παρατήρησης. Δηλαδή:

$$m_X(t_k) = m_X, \text{ για κάθε } t_k \quad (\text{Π.2.9})$$

- Οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και αυτομεταβλητότητας εξαρτώνται μόνο από τη χρονική διαφορά μεταξύ των t_k, t_i . Δηλαδή:

$$R_X(t_k, t_i) = R_X(t_k - t_i) \quad (\text{Π.2.10})$$

και

$$K_X(t_k, t_i) = K_X(t_k - t_i) \quad (\text{Π.2.11})$$

Οι συνθήκες (Π.2.9), (Π.2.10), (Π.2.11) ικανοποιούνται από κάθε αυστηρά στατική στοχαστική ανέλιξη.

Ευρείας έννοιας στατική (wide sense stationary) ή στατική με την ευρεία έννοια (stationary in the wide sense) στοχαστική ανέλιξη: Μία στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ χαρακτηρίζεται ως αυστηρά στατική εάν δεν είναι αυστηρά στατική, σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε παραπάνω, αλλά ικανοποιεί τις (Π.2.9), (Π.2.10), (Π.2.11).

Προφανώς, κάθε στατική με τη στενή έννοια στατική ανέλιξη είναι επίσης στατική με την ευρεία έννοια, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει.

Για μία στατική (με την ευρεία έννοια) στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ορίζεται ως εξής:

$$R_X(\tau) = E[X(t + \tau)X(t)] \quad (\text{Π. 2.12})$$

Αυτή η συνάρτηση έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες:

- Η μέση τετραγωνική τιμή της ανέλιξης είναι ίση με την τιμή της για $\tau=0$, δηλαδή:

$$R_X(0) = E[X^2(t)] \quad (\text{Π. 2.13})$$

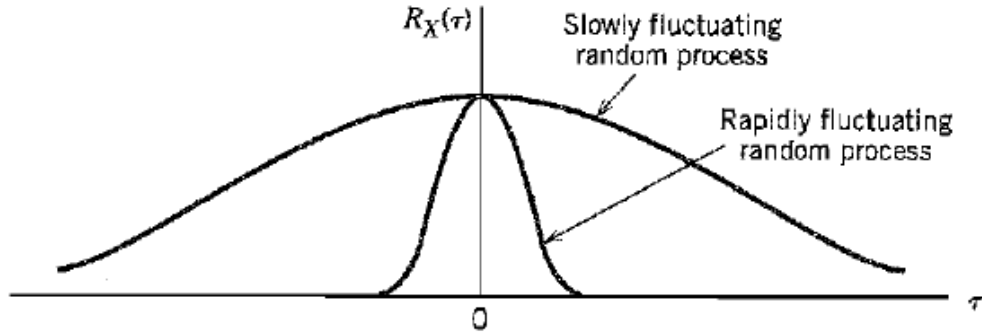
- Είναι άρτια συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή

$$R_X(\tau) = R_X(-\tau) \quad (\text{Π. 2.14})$$

- Έχει τη μέγιστη τιμή της για $\tau=0$, δηλαδή:

$$|R_X(\tau)| \leq R_X(0) \quad (\text{Π. 2.15})$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών που προκύπτουν από την παρατήρηση της ίδιας στοχαστικής ανέλιξης σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές με μεταξύ τους απόσταση τ . Όσο ταχύτερα μεταβάλλεται χρονικά η στοχαστική ανέλιξη $X(t)$, τόσο ταχύτερα μειώνεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης από τη μέγιστη τιμή της $R_X(0)$ καθώς το τ αυξάνει. Αυτό παρουσιάζεται και στο Σχ. Π.2.2.



Σχήμα Π.2.2 Απεικόνιση των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης μιας αργά και μιας γρήγορα ταλαντούμενης στοχαστικής ανέλιξης.

Συναρτήσεις Συσχέτισης (Cross-Correlation Functions) Στοχαστικών Ανελίξεων:

Έστω δύο στοχαστικές ανελίξεις $X(t)$ και $Y(t)$ με συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης $R_X(t, u)$ και $R_Y(t, u)$ όπου t, u είναι δύο χρονικές στιγμές παρατήρησης. Ορίζονται ως συναρτήσεις συσχέτισης (cross-correlation functions) των $X(t)$ και $Y(t)$ οι συναρτήσεις που δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_{XY}(t, u) = E[X(t)Y(u)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xy f_{X(t), Y(u)}(x, y) dx dy \quad (\text{Π. 2.16})$$

και

$$R_{YX}(t, u) = E[Y(t)X(u)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xy f_{Y(t), X(u)}(x, y) dx dy \quad (\text{Π. 2.17})$$

Πίνακας Συσχέτισης (Correlation Matrix) Στοχαστικών Ανελίξεων:

Οι ιδιότητες συσχέτισης δύο στοχαστικών ανελίξεων $X(t)$ και $Y(t)$ μπορούν να απεικονιστούν με τον πίνακα συσχέτισης ο οποίος έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{R}(t, u) = \begin{bmatrix} R_X(t, u) & R_{XY}(t, u) \\ R_{YX}(t, u) & R_Y(t, u) \end{bmatrix} \quad (\text{Π. 2.18})$$

Στοχαστικές Ανελίξεις από Κοινού Στατικές με την Ευρεία Έννοια: Εάν ο πίνακας συσχέτισης μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\mathbf{R}(t - u) = \begin{bmatrix} R_X(t - u) & R_{XY}(t - u) \\ R_{YX}(t - u) & R_Y(t - u) \end{bmatrix} \quad (\text{Π. 2.19})$$

τότε οι στοχαστικές ανελίξεις $X(t)$ και $Y(t)$ είναι η καθεμία στατική με την ευρεία και επιπλέον είναι από κοινού στατικές με την ευρεία έννοια.

Εργοδική Στοχαστική Ανέλιξη (Ergodic Process):

Μία στοχαστική ανέλιξη λέγεται εργοδική αν όλες οι στατιστικές της ιδιότητες μπορούν να καθορισθούν από μία συνάρτηση-δείγμα που παριστάνει μια δυνατή εμφάνιση της ανέλιξης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συνάρτηση Πιθανότητας Μάζας: Έστω ότι $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ δηλώνει το σύνολο τιμών της τυχαίας μεταβλητής X , η συνάρτηση πιθανότητας μάζας (PMF) για τη διακριτή τυχαία μεταβλητή X ορίζεται ως $p_i = p(X = a_i)$ για κάθε $i=1,2,\dots,N$.

Εντροπία: Εντροπία μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής X είναι μία συνάρτηση της PMF της μεταβλητής και ορίζεται από τη σχέση:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i = \sum_{i=1}^N p_i \log_2 \left(\frac{1}{p_i}\right) \quad (\text{Π. 3.1})$$

όπου $0 \log_2 0 = 0$.

Συνδυασμένη Εντροπία: Η συνδυασμένη εντροπία δύο διακριτών τυχαίων μεταβλητών (X, Y) ορίζεται από τη σχέση:

$$H(X, Y) = - \sum_{x,y} p(x, y) \log_2 p(x, y) \quad (\text{Π. 3.2})$$

Υπό Συνθήκη Εντροπία: Η υπό συνθήκη εντροπία της τυχαίας μεταβλητής X δεδομένης της τυχαίας μεταβλητής Y ορίζεται από τη σχέση:

$$H(X|Y) = - \sum_{x,y} p(x, y) \log_2 p(x|y) \quad (\text{Π. 3.3})$$

Θεώρημα Κωδικοποίησης Πηγής: Μία πηγή εντροπίας H μπορεί να κωδικοποιηθεί με αυθαίρετα μικρή πιθανότητα σφάλματος σε οποιοδήποτε ρυθμό R (bits/έξοδο πηγής) εφόσον $R > H$. Αντίστροφα, αν $R < H$, η πιθανότητα σφάλματος θα παραμένει μακριά από το μηδέν, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή που χρησιμοποιούνται.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχέση: Σχέση είναι οποιοδήποτε υποσύνολο ενός καρτεσιανού γινομένου.

Διαδική Σχέση: Διαδική Σχέση από ένα σύνολο X σε ένα σύνολο Y είναι μία συλλογή από διατεταγμένα ζεύγη $(x,y) \in X \times Y$. Για το συμβολισμό του « x σχετίζεται με y » χρησιμοποιείται το xRy .

Σχέση Ισοδυναμίας: Μία σχέση ισοδυναμίας σε ένα σύνολο X είναι ένα υποσύνολο του X^2 . Συγκεκριμένα, είναι μία συλλογή R από διατεταγμένα ζεύγη στοιχείων του X που ικανοποιούν τις εξής ιδιότητες:

1. Ανακλαστική ιδιότητα: $\forall x \in X, xRx$
2. Αντιμεταθετική ιδιότητα: $\forall (x,y) \in X^2, xRy \Leftrightarrow yRx$
3. Προσεταιριστική ιδιότητα: $\forall (x,y,z) \in X^3, xRy$ και yRz συνεπάγεται xRz

Αριθμήσιμο Σύνολο: Ένα σύνολο X λέγεται αριθμήσιμο όταν υπάρχει συνάρτηση από το σύνολο X στο σύνολο των φυσικών αριθμών $\mathbb{N} = \{0,1,2,3,\dots\}$.

Unit Simplex: Έστω ένα σύνολο $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. Το unit simplex που σχετίζεται με το X είναι το $\Delta(X) = \{(q_1, q_2, \dots, q_N) \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i=1}^N q_i = 1\}$.

Συνεκτικότητα: Ένα σύνολο χαρακτηρίζεται ως μη συνεκτικό αν είναι η ένωση δύο συνόλων που δεν έχουν κοινά στοιχεία. Διαφορετικά ονομάζεται συνεκτικό.

Κυρτό Σύνολο: Ένα σύνολο X χαρακτηρίζεται ως κυρτό όταν $\forall (x,y) \in X^2, \forall \mu \in [0,1], \mu x + (1 - \mu)y \in X$.

Κυρτή Συνάρτηση: Μία συνάρτηση $f: X \rightarrow Y$ είναι κυρτή όταν $\forall (x, x') \in X^2, \forall \mu \in [0,1]$:

$$f(\mu x + (1 - \mu)x') \leq \mu f(x) + (1 - \mu)f(x')$$

Κοίλη Συνάρτηση: Μία συνάρτηση $f: X \rightarrow Y$ είναι κοίλη αν $-f$ είναι κυρτή.

